T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARİ GÖRSELLEŞTİRMEDE SIVILARIN EMİLİM VE SAÇILIM DEĞERLERİNİN KÜRESEL AYDINLATMAYA ETKİLERİ

Ayhan MUCUR

DOKTORA TEZİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Bilgisayar Ortamında Mimarlık Programı

Danışman

Doç. Dr. Togan TONG

Temmuz, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARİ GÖRSELLEŞTİRMEDE SIVILARIN EMİLİM VE SAÇILIM DEĞERLERİNİN KÜRESEL AYDINLATMAYA ETKİLERİ

Ayhan MUCUR tarafından hazırlanan tez çalışması 22.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Bilgisayar Ortamında Mimarlık Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Togan TONG
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Togan TONG, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Leyla DOKUZER ÖZTÜRK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Şensin YAĞMUR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Abdurrahman Tuğrul YAZAR, Üye
İstanbul Bilgi Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Makbule Tuba BOSTANCI BASKAN, Üye
İstanbul Ticaret Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Togan TONG sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Mimari Görselleştirmede Sıvıların Emilim ve Saçılma Değerlerinin Küresel Aydınlatmaya Etkileri” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ayhan MUCUR

Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Doktora sürecinde, desteğini eksik etmeyen, bilgi ve tecrübesi ile yol gösteren değerli Tez Danışmanım Doç. Dr. Togan TONG'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte, verdikleri destek ve rehberlik ile çalışmanın bilimsel nitelik kazanmasında önemli rol oynayan tez izleme komite üyeleri Prof. Dr. Leyla DOKUZER ÖZTÜRK ve Prof. Dr. Abdurrahman Tuğrul YAZAR'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmasının teknik ölçümleme aşamasında, donanım desteği sağlayan Uzman Araştırmacı Dr. Zafer YÜCEL'e ve doktora eğitimi boyunca, sağladığı tüm katkı ve manevi desteği için aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayhan MUCUR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiv
ABSTRACT xvi
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 14
1.3 Hipotez 14
2 KÜRESEL AYDINLATMA MODELLERİ VE ALGORİTMALAR 16
2.1 Aydınlatma Teorisinin Temelleri 17
2.2 Radyometrik ve Fotometrik Büyüklükler 20
2.3 İşleme Denklemi 23
2.4 Küresel Aydınlatma Algoritmaları 24
2.4.1 Işın İzleme Yöntemleri 25
2.4.2 Sonlu Elemanlar Radyosite Yöntemleri 26
2.4.3 Monte Carlo Yol İzleme Yöntemleri 27
2.4.4 Hibrit Yöntemler 27
2.4.5 Foton Haritalama (Çoklu Geçiş) Yöntemleri 28
2.5 BRDF Tabanlı Aydınlatma Modeli 29
2.5.1 Deneysel Modeller 31
2.5.2 Fiziksel Tabanlı Modeller 33
2.5.3 Veri Odaklı Modeller 34
2.5.4 BRDF Tabanlı Aydınlatma Modellerin Karşılaştırılması 35

2.6 Katılımcı Medya Tabanlı Aydınlatma Modeli 36
2.6.1 Katılımcı Medya Tabanlı Aydınlatma Model Türleri 38
2.7 BRDF ile Katılımcı Medya Tabanlı Aydınlatma Modellerinin Karşılaştırılması 39
3 CORNELL KUTUSU VE SANAL SAHNE DENEYLERİ 43
3.1 Cornell Kutusu Deneyi 43
3.1.1 Deney Bileşenleri 44
3.1.2 Deney Yöntemi 50
3.1.3 Deney Bulguları 53
3.2 Sanal Sahne Deneyi 59
3.2.1 Deney Kurgusu 59
3.2.2 Sanal Sahne Malzeme Özellikleri 59
3.2.3 Sanal Sahne Deney Bulguları 60
4 ALGORİTMA 75
4.1 Algoritma Yapısı 75
4.2 Open Shading Language (OSL) ile Parametre Ekleme 77
4.2.1 Shader Değişkenleri 78
4.2.2 Shader Kodu 79
4.2.3 Algoritmanın Sanal Sahnede Testi 81
4.3 Görüntü İşleme Yazılımlarında Emilim ve Saçılım Parametrelerinin Karşılaştırılması 86
5 SONUÇ 88
KAYNAKÇA 90
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 99

SİMGE LİSTESİ

Φ	Işık Akısı (Luminous Flux)
σ_a	Emilim Katsayısı (Absorption Coefficient)
σ_s	Saçılım Katsayısı (Scattering Coefficient)
σ_t	İletim Katsayısı (Extinction Coefficient)
η	Verimlilik (Luminous Efficiency)
ρ	Albedo (Albedo)
p	Faz Fonksiyonu (Phase Function)
cd	Candela
cd/m²	Metrekare Başına Candela
E	Aydınlık Düzeyi (Illuminance)
I	Işık Şiddeti (Luminous Intensity)
L	Işıklılık (Luminance)
lm	Lumen
lx	Lux
nm	Nanometre
V	Volt
W	Watt
W/m²	Metrekare Başına Watt
W/(m²·sr)	Steradyan Başına Metrekare Başına Watt
W/sr	Steradyan Başına Watt

KISALTMA LİSTESİ

AR	Augmented Reality (Artırılmış Gerçeklik)
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function (Çift Yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu)
BSDF	Bidirectional Scattering Distribution Function (Çift Yönlü Saçılma Dağılım Fonksiyonu)
BSSRDF	Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function (Çift Yönlü Saçılma Yüzey Yansıma Dağılım Fonksiyonu)
BTP	Bidirectional Texture Functions (Çift Yönlü Doku Fonksiyonları)
CMYK	Cyan Magenta Yellow Black (Saf Mavi Saf Kırmızı Sarı Saf Siyah)
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu)
CSS	Cascading Style Sheets (Basamaklı Stil Şablonları)
GI	Global Illumination (Küresel Aydınlatma)
Hex	Hexadecimal Color (Onaltılık Renk Sistemi)
HSB	Hue Saturation Brightness Color Space (Ton Doygunluk Parlaklık Renk Uzayı)
HSL	Hue Saturation Luminance Color Space (Ton Doygunluk Işıklılık Renk Uzayı)
LOR	Light Output Ratio (Işık Çıkış Oranı)
MCRT	Monte Carlo Ray Tracing (Monte Carlo Işın İzleme)
OSL	Open Shading Language
RAL	Reichs-Ausschuß für Lieferbedingungen und Gütesicherung
RGB	Red Green Blue Color Space (Kırmızı Yeşil Mavi Renk Uzayı)
RTE	Radiative Transfer Equation (Işınım Transfer Denklemi)
UPBP	Unifying Points Beams and Paths (Birleştirici Noktalar Işınlar ve Yollar)
VPL	Virtual Point Light (Sanal Nokta Işığı)

VR	Virtual Reality (Sanal Gerçeklik)
VRL	Virtual Ray Light (Sanal Işın Işını)
VSL	Virtual Spherical Light (Sanal Küresel Işık)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Küresel aydınlatmalı bir sahnenin fotoğrafı: çoklu dağınık ve aynasal sıçramalar, kostik ve saçılmalar (Ritschel et al., 2012) **16**

Şekil 2.2 Işık ve madde etkileşimi (Ganovelli et al., 2015)..... **19**

Şekil 2.3 p noktasındaki BRDF, gelen ışık yönü ωi'den gelen ışığın, giden ışık yönü ωo'ya doğru yansıyan ışığın yüzdesini verir (Křivánek & Gautron, 2009). **22**

Şekil 2.4 İşleme denklemi geometrisi. (a) bir yüzeyden yayılan ışıklılık, yüzey emisyonu ve yansıyan ışığın toplamından oluşur. (b) Yansıyan ışık, yönlerin yarım küresi yerine sahnedeki tüm görünür yüzey noktalarından alınabilir (Kurachi & Stark, 2011). **24**

Şekil 2.5 Işığın temel yansıma modelleri (Goral et al., 1984). **29**

Şekil 2.6 BRDF ve katılımcı medya tabanlı modeller..... **40**

Şekil 3.1 Deney kutusu, armatür, spektroradyometre ve sıvılar..... **44**

Şekil 3.2 Cornell kutusunun ölçüleri **45**

Şekil 3.3 Deney kutusu ve RAL kodları..... **45**

Şekil 3.4 Deney ortamı **47**

Şekil 3.5 Armatürün ışık dağılım haritası..... **49**

Şekil 3.6 Konica Minolta CS-2000 Spektroradyometre cihazı **50**

Şekil 3.7 Boş kadeh ve 8 farklı sıvının Cornell kutusu yüzeylerindeki ışıklılık değer değişimi..... **50**

Şekil 3.8 Deney kutusu ve ölçüm noktaları..... **51**

Şekil 3.9 Örnek olarak verilen L10 noktasındaki ışık şeması **52**

Şekil 3.10 Kırmızı yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği..... **57**

Şekil 3.11 Beyaz yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği **57**

Şekil 3.12 Yeşil yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği..... **58**

Şekil 3.13 Boş kadeh, su ve süt V-ray gerçekçi görüntü işlemeleri **60**

Şekil 3.14 Zeytinyağı, beyaz şarap ve kırmızı şarap V-ray gerçekçi görüntü işlemeleri..... **60**

Şekil 3.15 Bira, bal ve üzüm sirkesi V-ray gerçekçi görüntü işlemeleri **61**

Şekil 3.16 Boş kadeh, su ve süt V-ray ışık analiz işlemeleri..... **61**

Şekil 3.17 Zeytinyağı, beyaz şarap ve kırmızı şarap V-ray ışık analiz işlemeleri. **61**

Şekil 3.18 Bira, bal ve üzüm sirkesi V-ray ışık analiz işlemeleri..... **62**
Şekil 3.19 Kırmızı yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği..... **65**
Şekil 3.20 Beyaz yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği **66**
Şekil 3.21 Yeşil yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği..... **66**
Şekil 3.22 Boş kadeh, su ve süt Corona gerçekçi görüntü işlemeleri..... **67**
Şekil 3.23 Zeytinyağı, beyaz şarap ve kırmızı şarap Corona gerçekçi görüntü işlemeleri..... **67**
Şekil 3.24 Bira, bal ve üzüm sirkesi Corona gerçekçi görüntü işlemeleri..... **67**
Şekil 3.25 Boş kadeh, su ve süt Corona dolaylı ışık analizi işlemeleri **68**
Şekil 3.26 Zeytinyağı, beyaz şarap ve kırmızı şarap Corona dolaylı ışık analizi işlemeleri..... **68**
Şekil 3.27 Bira, bal ve üzüm sirkesi Corona dolaylı ışık analizi işlemeleri **68**
Şekil 3.28 Kırmızı yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği..... **72**
Şekil 3.29 Beyaz yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği **73**
Şekil 3.30 Yeşil yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği..... **73**
Şekil 4.1 Önerilen algoritma yapısı **77**
Şekil 4.2 OSL gölgeleyici yapısı ve OSL arayüz **79**
Şekil 4.3 Gerçek maket ile V-ray ve V-ray + OSL gerçekçi görüntü işlemeleri (süt) **82**
Şekil 4.4 Gerçek maket ile V-ray ve V-ray + OSL gerçekçi görüntü işlemeleri (bira) **83**
Şekil 4.5 Gerçek maket ile V-ray ve V-ray + OSL gerçekçi görüntü işlemeleri (bal) **84**
Şekil 4.6 Gerçek maket ile V-ray ve V-ray + OSL gerçekçi görüntü işlemeleri (kırmızı şarap)..... **85**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Radyometrik ve fotometrik büyüklükler **21**
Tablo 2.2 Radyometrik büyüklükler ve formül ifadeleri **22**
Tablo 2.3 Katılımcı medyada kullanılan kavramlar ve birimler (Akenine-Möller et al., 2018) **37**
Tablo 2.4 BRDF ile katılımcı medya tabanlı modellerin karşılaştırılması **41**
Tablo 3.1 RAL renk kodlarının diğer renk sistemlerindeki eşdeğerleri **46**
Tablo 3.2 Armatürün teknik özellikleri **48**
Tablo 3.3 Armatürün fotometrik verileri **48**
Tablo 3.4 Cornell kutusu içindeki ölçüm noktaları **51**
Tablo 3.5 Cornell kutusunun kırmızı yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²) **54**
Tablo 3.6 Cornell kutusunun kırmızı yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²) **54**
Tablo 3.7 Cornell kutusunun beyaz yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²) **55**
Tablo 3.8 Cornell kutusunun beyaz yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²) **55**
Tablo 3.9 Cornell kutusunun yeşil yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²) **56**
Tablo 3.10 Cornell kutusunun yeşil yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²) **56**
Tablo 3.11 Kırmızı yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²) **62**
Tablo 3.12 Kırmızı yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²) **63**
Tablo 3.13 Beyaz yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²) **63**
Tablo 3.14 Beyaz yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²) **64**
Tablo 3.15 Yeşil yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²) **64**
Tablo 3.16 Yeşil yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²) **65**
Tablo 3.17 Kırmızı yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²) **69**
Tablo 3.18 Kırmızı yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²) **70**
Tablo 3.19 Beyaz yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²) **70**
Tablo 3.20 Beyaz yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²) **71**
Tablo 3.21 Yeşil yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²) **71**
Tablo 3.22 Yeşil yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²) **72**
Tablo 4.1 Emilim ve saçılım değerleri ile malzeme özellikleri arasındaki bağıntı **76**

Tablo 4.2 OSL ile hazırlanan kodun Shader değişkenleri..... **78**

Tablo 4.3 Gerçek maket, V-ray ve V-ray + OSL Shader ölçüm değerleri (süt) (cd/m²)..... **82**

Tablo 4.4 Gerçek maket, V-ray ve V-ray + OSL Shader ölçüm değerleri (bira) (cd/m²)..... **83**

Tablo 4.5 Gerçek maket, V-ray ve V-ray + OSL Shader ölçüm değerleri (bal) (cd/m²)..... **84**

Tablo 4.6 Gerçek maket, V-ray ve V-ray + OSL Shader ölçüm değerleri (kırmızı şarap) (cd/m²)..... **85**

Tablo 4.7 Gerçekçi görüntü sentezi yapan yazılımların yüzey malzemelerinin emilim ve saçılım parametrelerinin incelenmesi **86**

ÖZET

Mimari Görselleştirmede Sıvıların Emilim ve Saçılım Değerlerinin Küresel Aydınlatmaya Etkileri

Ayhan MUCUR

Mimarlık Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Togan TONG

Küresel aydınlatmada, şeffaf ya da yarı şeffaf malzemelerin emilim ve saçılım değerlerinin hesaplanması en zor fenomenlerden biridir. Emilim ve saçılım değerleri dolaylı aydınlatmayı etkilemektedir. Işık, özellikle sıvıların içinden geçerken benzersiz etkileşimler göstermekte, sıvının yoğunluğuna bağlı olarak emilip saçılmaktadır. Bu etkileşimler, sıvının görünüşünü, renk derinliğini ve berraklığını etkilemektedir. Emilim ve saçılım değerleri, dolaylı aydınlatmada nesnelerin yüzeylerinden yansıyan ya da içinden geçen toplam ışık enerjisinin değişmesine neden olmaktadır. Çoğunlukla bu olgu, gerçekçi görüntü işleme yapan yazılımlarında göz ardı edilmektedir. Yazılımlarda şeffaf ya da yarı şeffaf malzemelere bir emilim ve saçılım katsayısı girilmediğinde küresel aydınlatma değerleri değişmemektedir. Bu tez çalışmasında, sıvıların emilim ve saçılım değerlerinin küresel aydınlatmadaki etkilerini görmek için bir deney planlanmıştır. Deney, gerçek bir maket ile bu maketin bilgisayar yazılımları ile oluşturulmuş görüntülerinin karşılaştırması esasına dayanmaktadır. Deneyde 55x55x55 cm boyutlarında bir Cornell kutusu içerisine farklı sıvılar yerleştirilmiş ve her bir sıvı

için Cornell kutusunun yüzeylerindeki ışıklılık değerleri ölçülmüştür. Aynı sahne, dijital görüntü sentezi yazılımlar ile oluşturulmuştur. Sonrasında gerçek maket ile sanal görüntülerden elde edilen ışıklılık değerleri karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda, gerçekçi görüntü sentezi yapan yazılımlara şeffaf ve yarı şeffaf malzemelere emilim ve saçılım parametresinin eklenmesi önerilmiştir. Bu parametre, Sony Imageworks firması tarafından geliştirilen ve çok sayıda yazılım ile uyumlu olan Open Shading Language (OSL) dili ile hazırlanmıştır. Bu sayede, Cornell kutusunun gerçek ve dijital görüntülerindeki ışıklılık değerleri birbirine çok yaklaşmıştır.

Sonuç olarak, sıvıların emilim ve saçılım değerlerinin doğru bir şekilde modellenmesi, küresel aydınlatma algoritmalarının bir parçası olarak, fotogerçekçi görüntülerin üretilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu yöntem, malzemelerin fiziksel doğruluğa yaklaşmasında göz ardı edilmemesi gereken bir olgudur.

Anahtar Kelimeler: Küresel aydınlatma, dolaylı aydınlatma, emilim, saçılım, ışık transferi

ABSTRACT

Effects of Absorption and Scattering Values of Liquids on Global Illumination in Architectural Visualization

Ayhan MUCUR

Department of Architecture
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Togan TONG

In global illumination, the calculation of absorption and scattering values of transparent or semi-transparent materials is one of the most difficult phenomena. Absorption and scattering values affect indirect illumination. Light shows unique interactions, especially when passing through liquids, and is absorbed and scattered depending on the density of the liquid. Absorption and scattering values cause the total light energy reflected from the surfaces of objects or transmitted through them to change in indirect illumination. This phenomenon is mostly ignored in software that performs realistic image processing. When an absorption and scattering coefficient is not entered for transparent or semi-transparent materials in the software, the global illumination values remain unchanged. In this thesis, an experiment is planned to see the effects of absorption and scattering values of liquids on global illumination. The experiment is based on the comparison of a real model and the images of this model created with computer software. In the experiment, different liquids were placed in a 55x55x55 cm Cornell box, and the luminance values on the surfaces of the box were measured for each liquid. The same scene was created with digital image synthesis software. Afterward, the

luminance values obtained from the real model and virtual images were compared. As a result of the analysis, it was suggested to add an absorption and scattering parameter for transparent and semi-transparent materials to realistic image synthesis software. This parameter was prepared with the Open Shading Language (OSL) developed by Sony Imageworks and is compatible with many software applications. In this way, the luminance values in the real and digital images of the Cornell box are very close to each other.

In conclusion, accurate modeling of the absorption and scattering values of liquids plays a critical role in the generation of photorealistic images as part of global illumination algorithms. This method is a phenomenon that should not be ignored in approaching the physical accuracy of materials.

Keywords: Global illumination, indirect illumination, absorption, scattering, light transport

1
GİRİŞ

Gerçekçi görüntü sentezi; gerçek fotoğraftan ayırt edilemeyecek görüntüleri, hesaplamalı yöntemler ve gelişmiş teknikler kullanarak oluşturma sürecidir. Temeli bilgisayar grafikleri ile başlayan bu süreç; teknolojik ilerlemelere paralel olarak gelişmektedir. Gerçek görüntü sentezinin, film ve video endüstrisi, sanal (VR) ve artırılmış (AR) gerçeklik, mimari ve şehir planlama, endüstriyel tasarım, eğitim simülasyonları ve tıbbı görüntüleme gibi birçok alanda önemli uygulama alanları bulunmaktadır.

Gerçekçi görüntü sentezi, mimarlıkta önemli bir rol oynamakta ve sadece görselleştirme amacıyla sınırlı kalmamaktadır. Bir yapının nasıl görüneceğini belirlemenin ötesinde, bina bilgi modelleme, yapı fiziği ve malzeme analizi için de verimli bir araç olmaktadır. Bu teknoloji, malzemelerin ışıkla olan etkileşimini simüle ederek, yansıtıcılık, geçirgenlik ve kırılım gibi fiziksel özelliklerin ölçülmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca gerçekçi görüntü sentezi, sanal ve artırılmış gerçeklik (VR-AR) teknolojileri ile entegre edildiğinde, mimarlık ve tasarım alanlarında üst düzey etkileşim potansiyeline sahiptir. Görüldüğü üzere, gerçekçi görüntü sentezi, doğru ve etkili kullanıldığında projelerin hem estetik ve hem de fonksiyonel açıdan iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

1.1 Literatür Özeti

Gerçekçi görüntü sentezinin temel amacı, ışığın doğal davranışını simüle etmek, nesnelerin ve sahnelerin görsel doğruluğunu artırmaktır (Dutré et al., 2006). Bu amaca ulaşmak için, ışık transferi, karmaşık malzemeler ve fiziksel doğrulukta modeller kullanmak gerekmektedir. Işık madde etkileşiminin temel ilkeleri anlaşılmış olsa da verimli bir hesaplama hala zorlu bir süreçtir (Ritschel et al., 2012).

Bilgisayar grafikleri son 30 yılda önemli ölçüde değişmiştir. Fiziksel gerçekliğe yakın bir sahne oluşturmak; ışığın tüm nesnelerden yansımasını ve her noktadaki ışık enerjisinin hesaplanması anlamına gelmektedir. 1980'lerden önceki ışık simülasyonu, sadece yerel aydınlatma modelleri ile sınırlı kalmıştır. Temeli ışığın yansıması prensibine dayanmakta olan bu modellerde, Snell yasası ve Fresnel denklemleri gibi bilinen fizik yasaları ışığın davranışını belirlemektedir. Yerel aydınlatma modelleri, yalnızca yüzey özelliklerine ve ışık kaynaklarına bağlıdır. Bu nedenle, sahnedeki yüzeylerden yansıma nedeniyle oluşan aydınlık miktarı hesaba katılmamıştır. Nesnelerin dışında, tüm sahnenin aydınlatılması çözülmesi gereken bir problem haline gelince, küresel aydınlatma yöntemleri ortaya çıkmıştır. Küresel aydınlatma, tüm nesneleri aydınlatma kaynağı olarak kabul etmekte, bir ortamdaki her noktadan her yöne yayılan ışığın şiddetini ve yoğunluğu belirlemektedir.

Doğrudan aydınlatma, dolaylı aydınlatma, yansıma ve kırılma, gölgeler, kostik efektler ve küresel aydınlatma, ışığın davranışını modellemedeki temel prensiplerdir. Bu prensipleri modellemek için kullanılan algoritmalar arasında ışın izleme (*ray tracing*), yayılım (*radiosity*), foton haritası (*photon mapping*), ve yol izleme (*path tracing*) bulunmaktadır. Bütün bu algoritmalar, küresel aydınlatmayı hesaplamak için kullanılan farklı yöntemlerdir. Işık davranışını örnekleyen her bir yöntemin, diğerlerine göre avantajlı ve dezavantajlı yönleri bulunmaktadır. Işın izleme (*ray tracing*); bir model aracılığıyla sonsuz küçük ışık demetlerini izleyen bir nokta örnekleme tekniğidir (Whitted, 1980). 1980'de başlayan temel ışın izleme, ışık ışınlarının gözlemciden ışık kaynaklarına doğru izlenmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yaklaşım yalnızca ayna yansımalarını, kırılmalarını ve doğrudan aydınlatmayı ele almakta, alan derinliği, hareket bulanıklığı, kostik ve ayna yansıması gibi etkileri hesaplayamamaktadır. Yayılım (*radiosity*); dolaylı aydınlatma efektlerini hesaplamak için geliştirilmiştir (Cohen & Wallace, 1993). Bu teknik, sahnedeki her yüzeyin hem ışığı alması hem de bir ışık kaynağı gibi davranabilmesi fikrine dayanmaktadır. Sahnedeki yüzeyler arasındaki ışık alışverişi dengesinin hesaplandığı ışık izleme yöntemlerine bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Yayılım algoritması, ışığın yüzeylerden yansıması ve şeffaf nesnelerin içinden geçmesi gibi ışık etkileşimlerini simüle etmekle sınırlı kalmaktadır. Yayılım, esas olarak yüzeyler arası dolaylı ışık transferini ve bu ışığın dağılımını hesaplamak için tasarlanmıştır. Bu yöntem, yansıma ve kırılma gibi

etkileşimleri doğru bir şekilde simüle edebilmesi için genellikle ışın izleme gibi diğer yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır. Yayılım yönteminin gücü, sahnenin genel aydınlatmasını, dolaylı ışık efektlerini ve ışığın yüzeyler arasındaki dağılımını hesaplamasından gelmektedir. Foton haritalaması (*photon mapping*); ışın izleme ve yayılım yöntemlerinin yetersiz olduğu materyal ve yüzey koşullarında oldukça başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır (Jensen, 2001). Bu yöntem, küresel aydınlatma hesaplamalarında kullanılan iki aşamalı bir yöntemdir. İlk aşama, ışık kaynaklarından çıkan fotonların saçılması ve bu fotonların yüzeylerle etkileşimlerinin kaydedilmesidir. İkinci aşama ise, bu bilgileri kullanarak görsel olarak doğru görüntüler üretmek için yapılan ışık hesaplamalarıdır. Foton haritalama, dolaylı aydınlatma, kostik (*caustics*) ve diğer karmaşık ışık etkileşimlerini modellemek için uygundur. Özellikle şeffaf ve yarı şeffaf nesnelerin simülasyonunda ışık izleme ve yayılım gibi yöntemlere göre daha verimlidir. Yol izleme (*path tracing*) yöntemi ise, ışığın bir sahne içerisindeki karmaşık etkileşimlerini simüle eden güçlü bir gerçekçi görüntü sentezi yöntemidir (Kajiya, 1986). Işık yollarının sahnedeki ilerleyişlerini izleyerek, yansıma, kırılma, gölgeler ve dolaylı aydınlatma gibi fenomenleri doğal bir şekilde modelleyebilmektedir. Bu yöntem, gerçek dünyanın fiziksel yasalarına dayalı olarak çalışır. Bu sayede dolaylı aydınlatma, karmaşık yansımalar ve kostik (ışığın kırılma sonucu oluşturduğu parlak ışık desenleri) gibi zorlu efektleri kolaylıkla oluşturabilmektedir. Tüm bu temel yöntemlere ek olarak, çift yönlü ışın izleme (*bidirectional ray tracing*), Metropolis ışık transferi (*Metropolis light transport*), Monte Carlo ışın izleme (*Monte Carlo ray tracing*) gibi tamamlayıcı algoritmalar da temel yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır.

Gerçekçi görüntü sentezi, birbirine paralel iki farklı işleme sürecini içermektedir. Bunlardan birincisi, tekil olarak nesne ve ışık etkileşimine odaklı yerel aydınlatma modelleri, ikincisi ise sahnedeki tüm nesnelerin ışık ile etkileşimini hesaplayan küresel aydınlatma algoritmalarıdır. Yerel aydınlatma modelleri, genellikle nesnelerin karakteristik yansıma özelliklerini ve yansıyan ışığın dağılımını belirleyen fonksiyonlardır. Çift yönlü yansıma dağılım fonksiyonu (*BRDF – bidirectional reflectance distribution function*) olarak adlandırılan bu fonksiyon, ilk olarak Nicodemus tarafından tanımlanmıştır (Nicodemus et al., 1977). BRDF, günümüzde tüm işleme sistemlerinde kullanılan radyometrik bir fonksiyondur.

Genel olarak, gelen ışık enerjisinin yüzey üzerinde bir yarım küre boyunca her yöne dağılımını çözümlemektedir. Ancak bu dağılım ışığın gelme açısına bağlı olarak farklı şiddet ve doğrultularda olabilir. Araştırmacılar çok sayıda izotropik ve anizotropik BRDF ölçümlemeleri yaptıktan sonra bu malzemeler için uygulama teknikleri önermişlerdir. Tarihsel olarak, BRDF Nicodemus tarafından daha genel bir tanımlama olan çift yönlü saçılma yüzey yansıma dağılım fonksiyonunun (*BSSRDF – Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function*) opak yüzeyler için basitleştirilmiş bir halidir. BRDF, bir yüzey üzerindeki ışın taşınımını tanımlarken, BSSRDF ise yüzey ve yüzey altı olmak üzere iki farklı alanda ışın taşınımını çözümlemektedir. Ancak, BRDF modelleri süt, mermer ve deri gibi pek çok yarı şeffaf malzeme, yüzey ayrıntılarını yumuşatan ve ışığın geçmesine olanak veren yüzey altı saçılma davranışlarını hesaplayamamaktadır. Araştırmacılar bu malzemelerin işlenmesi için birçok teknik önermiştir.

Son 40 yılda birbirinden farklı malzemeleri temsil etmek için birçok BRDF modeli önerilmiştir. Genel olarak tüm BRDF modeller ışıkla etkileşim ve hesap yöntemlerine göre deneysel, fiziksel tabanlı ve veri odaklı olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır.

Deneysel modeller tamamen yansıma verilerine dayanmakta ve bu veriler analitik formüllerle temsil edilmektedir. Ancak bu hesaplama, yaklaşım ve benzetme temeline dayalı olduğundan sonuçlar gerçek dünya malzemelerine tam olarak benzememektedir. Lambert olmayan yüzeyler için en eski ve ilk model Phong modelidir (Phong, 1975). Kosinüs yasasına dayanan bu model, hafif pürüzlü yüzeylere sahip malzemelerin yansıma özelliklerini analitik bir yaklaşımla hesaplamaktadır. Hem ayna hem de dağınık yansıma etkilerini simüle eden Phong modeli, enerjinin korunumu kanunu ve Helmholtz karşılıklılık ilkesini göz ardı etmektedir. Daha sonra Phong modeli geliştirilerek Blinn-Phong yansıma modeli öne sürülmüştür (Blinn, 1977). Yakın zamana kadar OpenGL ve Direct3D için varsayılan gölgelendirme modeli olarak kullanılmasına rağmen, Phong modeli ile aynı dezavantajlara sahiptir. Fiziksel doğruluk açısında yetersiz kalan bu model, metalik yüzeyler ve ayna yansımalarında başarılı sonuçlar sunamamaktadır. Ward yansıma modeli, doğrulama amacıyla ölçülen BRDF modellerine uyum sağlamak için özel olarak tasarlanmıştır (Ward, 1992). Model, izotopik ve anizotropik yansımayı temsil edebilmekte, ayna ve dağınık yansıma çözümlerinde Gauss

dağılım fonksiyonlarını kullanmaktadır. Bu model, Monte Carlo örneklemesi için oldukça verimlidir. Fakat enerjinin korunumu kanuna uymamaktadır. Neumann ve ekibi Phong, Blinn ve Ward modelleri için bazı düzeltmeler önermiştir (Neumann et al., 1999). Güncellenmiş modeller, metal yüzeyler ve yansıtıcı özellikler bakımından daha verimli sonuçlar ortaya koymuştur. Lafortune modeli, gerçek yüzeylerden alınan ölçümlerle tasarlanmış, esnek ve deneysel bir modeldir (Lafortune et al., 1997). Temeli Phong modeline dayanan bu model, enerjinin korunumu kanunu ve karşılıklılık ilkesini sağlamaktadır. Sonrasında ileri sürülen Ashikhmin-Shirley modeli ise Phong yansıma modelini temel almakta hem dağınık hem de ayna yansımayı verimli bir biçimde tanımlamaktadır (Ashikhmin & Shirley, 2000). Bu yaklaşımda yansıma, bakış açısına göre değişmektedir. Teğet açılarda ayna, normal açılarda ise dağınık yansıma oluşmaktadır. Bu model, mikro-yüzey (*microfacet*) türlerini genelleştirip, bunların çeşitli açı ve büyüklüklerde olduğunu varsaymaktadır. Ashikhmin-Premoze modeli mikro-yüzey teorisini takip etmekte ve verimli bir örnekleme tekniği sunmaktadır (Ashikhmin & Premoze, 2007). Bu model, analitik bir modeli veri odaklı bir dağılımla birleştirmektedir. Ayrıca geri yönde saçılma ölçümlerinin modele uygulaması üzerine bir çözüm önermektedir.

Fiziksel temelli modellerin ilki olan Cook-Torrance modeli, mikro-yüzey teorisini temel alan metal ve dielektrik malzemeleri ayıran bir yaklaşımdır (Cook & Torrance, 1982). Ayna ve dağınık yansımaları göz önünde bulundurarak Lambertian türü yansımaları oluşturması, bu modeli bilgisayar grafiklerinde oldukça popüler bir seçenek haline getirmiştir. Ardından Walter ve ekibi, mikro-yüzey teorisini pürüzlü mat ve şeffaf nesneler için geliştirmiştir (Walter et al., 2007). Bu gelişmelerden daha önce, He ve ekibi Cook-Torrance modeli dahil olmak üzere birçok geometrik optik modelin kapsamını genişletmiştir (He et al., 1991). Bu yeni model, ışığın elektromanyetik özelliğini hesaplamalara ekleyerek kırılım ve girişim gibi fiziksel etkileri simüle etmektedir. Tamamen fiziksel temellere dayanan bu model, pürüzlü ve pürüzsüz yüzeylere sahip metal, metal olmayan ve plastik gibi nesneleri etkili bir biçimde temsil edebilmektedir. Oren-Nayar, Lambertian modelini geliştirmiş, beton, kum ve kumaş gibi gerçek dünya malzemelerinin davranışlarını daha gerçekçi bir şekilde tanımlamak amaçlayan bir yaklaşım sunmuştur. Bu model, dağınık yüzeylerin fiziksel özelliklerini daha doğru bir şekilde temsil etmeyi hedeflemiştir (Oren & Nayar, 1994). Bu dönemde, farklı

şeffaflık ve yansıma özelliklerine sahip çok katmanlı malzemeler için birçok çalışma yapılmıştır. Ershov ve ekibi, otomobil boyasını taklit eden, içinde parçacık ve simli pulların ver aldığı bir yöntem öne sürmüştür (Ershov et al., 2001). Yöntemin çok katmanlı bir yapıya sahip olması, BRDF'ye farklı bir bakış açısı getirmiştir. Ancak, çok katmanlı bu yöntemin dezavantajı hesaplama sürelerinin çok uzun olmasıdır. Bu model daha sonra güncellenerek, Lambertian yansımayı destekleyen bir üst katman ve pullu bir ışıltı sunan alt katmanla sınırlandırılmıştır. Bu dönemde, çok katmanlı çözüm önerilerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Weidlich ve Wilkie pürüzlü ve pürüzsüz çok katmanlı malzemeleri simüle edebilmek için birçok mikro-yüzey tabanlı katmanı tek bir fiziksel BRDF modelinde birleştirmiştir (Rump et al., 2008). Yöntemde mikro-yüzey etkisi katmanların kalınlığına bağlı olarak değiştirmektedir. Ayrıca ışığın şeffaf katmanların içinden geçerken bir kısmının emilme özelliği ilk defa bu yöntemde ortaya konulmuştur. Araba boyasının karmaşık yansıma davranışını tanımlayan yeni bir yöntemi Rump ve ekibi önermiştir (Rump et al., 2008). Bu yöntem, ilk hibrit analitik BRDF ve görüntü tabanlı çift yönlü doku fonksiyonları (*BTF – bidirectional texture functions*) olarak gösterilmektedir. Kurt ve ekibi fiziksel temelli yeni bir BRDF modeli önermiştir (Kurt et al., 2010). Anizotropik malzemeleri temsil edilebilen ve verilere uyum sağlayabilen bu model, Ward ve ekibinin önerdiği yönteme dayanmaktadır. Yöntem verimli bir örnekleme yöntemi sunduğu için, Monte Carlo işlemelerine uygundur. Ardından Low ve ekibi parlak yüzeyler için mikro-yüzey teorisi ve Rayleigh-Rice ışık saçılım teorisine uygun iki benzer izotopik model önermiştir (Löw et al., 2012). Fizik temelli BRDF modellerindeki en dikkat çekici ilerlemelerden biri, Dupuy ve ekibinin geliştirdiği, herhangi bir malzeme türünü mikro-yüzey temelli bir BRDF'ye dönüştürmeyi mümkün kılan bir yaklaşım olmuştur (Dupuy et al., 2015).

Veri odaklı BRDF, diğer bir değişle önceden ölçülmüş verilerle oluşturulmuş malzemeler, foto gerçekçi görüntü sentezinin temel bir bileşen haline gelmektedir. Bunun asıl nedeni, veri odaklı modellerin, zor tanımlanabilen malzemelerin görsel görüntülerin en ince ayrıntılarına kadar oluşturulabilmesidir. Matusik ve ekibi, farklı ışık ve gözlem açıları altında çeşitli gerçek dünya malzemelerinin veri odaklı yansıma verilerini oluşturduklarını açıklamıştır (Matusik et al., 2003). Toplanan ölçüm sonuçları MERL BRDF veri tabanı adıyla herkesin kullanımına sunulmuştur.

Ardından Romeiro ve ekibi, ölçümleme konusunda yeni bir yöntem geliştirdiklerini duyurmuşlardır (Romeiro et al., 2008). Bu yöntem, izotropik malzemelerin yansıma özelliklerini belirlemek amacıyla, bilinen doğal aydınlatma koşulları altında kavisli bir yüzeyden elde edilen görüntülerin analizine dayanmaktadır.

Yerel aydınlatma modelleri ile küresel aydınlatma algoritmaları, karmaşık hesaplamalar ve zorlu bir süreç gerektirmektedir. Araştırmacılar, bu alanda her geçen gün yeni yöntemler geliştirmeye devam etmektedir.

Küresel aydınlatmada, hesaplanması en karmaşık durum, ışığın şeffaf ve yarı şeffaf nesnelerin içinden geçişidir. Işık özellikle sıvıların içinden geçerken, sıvının yoğunluğuna ve bileşenlerine bağlı olarak emilme ve saçılma davranışları göstermektedir. Bu etkileşimler, sıvının görünümünü, renk derinliğini ve içindeki nesnelerin berraklığını belirlemektedir. Emilim (*absorption*); ışığın bir ortamda ilerlerken enerjisinin kısmen ya da tamamen soğurulması ve ortam tarafından tutulmasıdır. Sıvılar, belirli dalga boylarındaki ışığı emmekte, bu da sıvının kendine özgü bir renk kazanmasına neden olmaktadır. Emilim değerlerinin doğru bir şekilde simüle edilmesi, sıvıların gerçekçi bir renk ve derinlik hissi kazanmasını sağlamaktadır. Saçılım (*scattering*); ışığın bir ortamdan ilerlerken yön değiştirmesidir. Bu özellik, ışığın sıvı içerisinde daha geniş bir alana yayılmasına ve bu süreçte dağınık bir aydınlatma etkisi oluşturmasına neden olmaktadır. Sıvı içindeki saçılımın doğru bir şekilde modellemesi, sıvının opaklık derecesini ve içerisindeki nesnelerin berraklığını etkilemektedir. Emilim ve saçılım değerlerinin doğru bir şekilde hesaplanması hem sıvıların hem de içerisinde bulunan nesnelerin renklerinin gerçekçi bir şekilde görülmesini sağlar ve sahnenin genel atmosferine önemli ölçüde katkıda bulunur. Sıvıların derinliklerine bağlı olarak değişen emilim oranları, sahnede doğal bir derinlik algısı oluşturmaktadır. Saçılım ise, sıvı içinde ve çevresinde dağınık aydınlatma etkileri yaratarak gölgelerin daha gerçekçi görünmesini sağlamaktadır. Emilim ve saçılımın birlikte etkisi, bulanıklık ya da berraklık derecesini belirleyerek, sıvı içindeki nesnelerin görünürlük seviyesini doğrudan etkilemektedir.

Geleneksel görüntü işlemede kullanılan denklem, yansıyan ve yayılan ışımanın toplamının esas alındığı bir denklemdir (Kajiya, 1986; Nicodemus, 1965). Bu denklem, yüzeyler arasındaki ışıksal akının transferini içermekte, ışık malzeme etkileşimini çift yönlü saçılma dağılım fonksiyonu (*BSDF – Bidirectional*

Scattering Distribution Function) ile hesaplamaktadır. Opak ve şeffaf nesneler için doğru hesaplama yapan bu denklem, katılımcı ortamlar için yetersiz kalmaktadır. Işığın katılımcı ortamlar içinde hareket ederken, emilim, saçılım ve yayılımını hesaplayan denklem, ışınım transfer denklemidir (*RTE – Radiative Transfer Equation*) (Kajiya & Von Herzen, 1984). Ayrıca ışık hacim içinde hareket ederken, katı bir yüzeye çarparsa burada geleneksel işleme teknikleri de kullanılmaktadır. Yol izleme tekniklerinin hesaplamalara dahil edilmesi hem yüzey hem de yüzey altı saçılımı gerektiren bir ortamı işleme olanağı sağlamaktadır. Yol izleme tekniği, hibrit tekniklerin kullanıldığı durumlarda en çok tercih edilen yöntemdir (Fascione et al., 2018).

Yarı şeffaf malzemeleri simüle etmenin en yaygın yöntemlerinden biri, ışığın malzeme içerisindeki hareketini bir BSSRDF çift yönlü saçılma yüzey yansıma dağılım fonksiyonu (*BSSRDF – Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function*) aracılığıyla modellemektir. BSSRDF, genel anlamda, bir yüzey noktasına gelen ışığın, yüzeydeki başka bir noktadan çıkan ışıkla olan doğrusal ilişkisini ifade etmektedir. Doğru ve etkili bir BSSRDF modeli oluşturmak, son yirmi yıl boyunca araştırmaların odak noktası haline gelmiştir. Difüzyon teorisinin ve difüzyon dipolünün bilgisayar grafiklerine entegre edilmesi gibi son yenilikler, birçok pratik yüzey altı ışık iletim modelinin temelini oluşturmuş, aynı zamanda çok sayıda yeni BSSRDF modellerinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Jensen et al., 2001; Stam, 1995). İşleme tekniklerindeki ilerlemeler ve artan hesaplama gücü, yüzey altı saçılma efektlerinin film yapımında kullanılmasını mümkün hale getirerek, araştırmacıların iş akışı ve görsel kalite açısından en uygun BSSRDF modellerini belirleyip geliştirme konusunda ilgisini artırmıştır.

Stam'ın bilgisayar grafiklerine kazandırdığı difüzyon yaklaşımı, difüzyon denklemi aracılığıyla çoklu saçılmayı modelleyerek, birçok başarılı BSSRDF modelinin temelini oluşturmuştur (Stam, 1995). Klasik difüzyon teorisi üzerine yapılan çalışmalardan yola çıkan Jensen ve ekibi, uygulanabilir bir difüzyon dipol modeli geliştirmişlerdir (Jensen et al., 2001). Hanrahan ve Krueger'in çalışmalarına dayanan, tek bir saçılma terimiyle birleşen bir BSSRDF oluşturulmuş ve bu yöntem yarı şeffaf malzemelerin görselleştirilmesinde kullanılmıştır (Hanrahan & Krueger, 1993). Donner ve Jensen, bu çalışmayı daha kapsamlı bir şekilde geliştirerek çok

kutuplu bir yaklaşım kullanmış ve bunu çok katmanlı malzemelerin görüntülenmesi alanında uygulamışlardır (Donner & Jensen, 2005). D'Eon ve Irving, klasik difüzyon teorisindeki çeşitli iyileştirmelere ek olarak, Gauss dağılımlarının toplamına dayanan yeni bir difüzyon ve çoklu saçılma terimi de geliştirmiştir (d'Eon & Irving, 2011).

Yarı şeffaf malzemelerin gerçekçi bir şekilde görselleştirilebilmesi için, malzeme içindeki farklı katmanların özellikleri dikkate alınmalıdır. Heterojen malzemelerin temsili, son dönem araştırmaların merkezinde yer almaktadır. Tong ve ekibi, yarı homojen malzemelerin simülasyonunda dipol modelini çift yönlü doku fonksiyonlarıyla entegre etmiştir (Tong et al., 2005). Peers ve ekibi, heterojen malzemeler için kompakt bir temsil geliştirmek amacıyla matris çarpanlarına ayırma yöntemini kullanmıştır (Peers et al., 2006). Wang ve ekibi, heterojen malzemelerin modellenmesi ve görselleştirilmesi için hacimsel temsil ve difüzyon denklemine dayanan bir yöntem geliştirmiştir (Wang et al., 2008). Song ve ekibi, küresel bir BSSRDF modelini yerel fonksiyonların çarpımına ayırarak heterojen malzemelerin ölçümlerini düzenlemek için yenilikçi bir yaklaşım geliştirmiştir (Sun et al., 2010). Wang ve ekibi, karmaşık şekillere ve topolojilere sahip heterojen yarı şeffaf nesnelerin görselleştirilmesine yönelik güvenilir bir yöntem geliştirmiştir (Wang et al., 2010). Jakob ve ekibi, anizotropik yarı şeffaf malzemelerin görselleştirilmesi amacıyla bir anizotropik dipol modeli geliştirmiştir (Jakob et al., 2010). Li ve ekibi, yarı şeffaf kesitlerin oluşturulmasına yönelik etkileşimli bir yöntem geliştirmiştir (Li et al., 2013). Heterojen yarı şeffaf malzemeler olarak ele alınan insan derisi ve yüzlerini modellemek ve yeniden oluşturmak amacıyla pek çok yeni yöntem geliştirilmiştir (Donner et al., 2008; Ghosh et al., 2008; Jimenez et al., 2010).

Ortam aydınlatması, doğal ışık koşulları altında malzemelerin gerçekçi bir görünüm elde etmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Daha önceki birçok çalışma, ortam aydınlatması altında gerçekçi yarı şeffaf malzemelerin oluşturulması ve düzenlenmesi konusuna odaklanmıştır. Ancak bu çalışmaların tamamı, genellikle büyük miktarda önceden hesaplanmış veriye dayanan ve dinamik sahneler için yeterince uygun olmayan önceden hesaplanmış ışık transferi yöntemlerini kullanmaktadır (Wang et al., 2005; Wang et al., 2008; Xu et al., 2007).

Modern gerçekçi görüntü sentezi; sis, duman, mum, cilt ve sıvılar gibi katılımcı ortamlar ile ışık etkileşimini yeniden tanımlamaktadır. Gelen ışık bu katılımcı ortamlarla karmaşık biçimde etkileşime girmekte, ortam sınırlarında kırılmakta ve ortam içinde ilerlerken emilip saçılmaktadır. Bu fiziksel fenomenler, malzemenin genel görünümünü değiştirmektedir. Kırılma, hacimsel kostiklere, emilim ve saçılma ise bulanık ve daha koyu bir görüntüye neden olmaktadır. Fiziksel olaylara dayalı bu karmaşık etkileşim, katılımcı ortamlarda ışık taşınımını simüle etmeyi zor bir araştırma problemi haline getirmiştir.

- **Yüzey Altı Saçılması**

Geçmişte yapılan araştırmalar, katılımcı ortamlardaki karmaşık ışık iletimi sorununa yönelik bir dizi çözümler ortaya koymuştur. Hesap verimliliğini artırmak amacıyla yüzey altı saçılma etkisi genellikle tekli ve çoklu saçılma bileşenlerine ayrılmıştır. Tekli saçılma ışığın ortam içinde yalnızca bir kez saçılmasını ifade ederken, çoklu saçılma ışığın birçok kez saçılmasını kapsamaktadır. Tekli saçılma hızlı hesaplanırken, çoklu saçılma hesaplama süresini azaltmak için bazı basitleştirici varsayımlar kullanmaktadır.

Çözümlerin çoğunda, yalnızca doğrudan aydınlatma hesaplanmakta ve çoklu saçılma etkisi göz ardı edilmektedir. Katılımcı ortam içinde küresel aydınlatmayı hesaplamak için en basit ve çok yönlü çözüm, Monte Carlo yöntemidir. Bu yöntem, ortam içinde rastgele bir foton demetini izleyerek her bir fotonu simüle edip aydınlatmayı tahmin etmektedir. Bir foton yarı şeffaf bir katılımcı ortam içine girdiğinde ortamdan çıkmadan önce birçok kez sıçrayabilir. Monte Carlo yol izleme teknikleri, yarı şeffaf bir malzeme içindeki ışığın saçılmasını yüksek doğrulukla simüle etmektedir. Ancak bunun için uzun hesaplama süreleri gerekmektedir. Hanrahan ve Krueger tarafından sunulan yöntem, bu konudaki ilk gelişmelerden biridir (Hanrahan & Krueger, 1993). Bu yöntem, çok katmanlı yüzeylerde yüzey altı saçılması için yeni bir model sunmaktadır. Farklı homojen ortam katmanlarında tekli saçılma için analitik bir çözüm ve çoklu saçılma katkısını hesaplamak için doğru bir Monte Carlo algoritması sunmuşlardır.

Stam, katılımcı ortamlarda çoklu saçılmayı çözmek için yeni bir difüzyon yaklaşımını tanıtmıştır (Stam, 1995). Sonlu elemanlar yöntemiyle difüzyon denklemini çözebilen bu sayısal yöntem, karmaşık sahneler için verimli değildir.

Yarı şeffaf malzemeler içindeki saçılma simülasyonu, geleneksel yol örnekleme teknikleriyle çözülebilen ışınım transfer denklemine (*RTE – Radiative Transfer Equation*) dayanmaktadır. Özellikle çok sayıda ışık sıçraması çözümünde kullanılan ışınım transfer denklemi, hesaplama süreleri açısından zorlu bir işlemdir. Hesaplama sürelerini azaltmak için kullanılan optimizasyon tekniklerden biri de Dipol yöntemidir. Dipol yöntemi, katılımcı ortamın pratik bir şekilde işlenmesi için geliştirilmiştir (Jensen et al., 2001). Yarı şeffaf malzemelerde yüzey altı ışık taşınımını sağlayarak, BRDF modellerinin hesaplayamadığı renk kayması (*color bleeding*) ve ışığın gölge sınırları boyunca yayılması gibi etkilerin daha verimli bir şekilde simüle edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntem, çoklu saçılmanın baskın olduğu ve yüksek yansıma oranına sahip malzemelerde daha iyi sonuç vermektedir. Yönlü Dipol yöntemi, standart Dipol yönteminin yenilikçi bir versiyonu olup, teorik alt yapısında var olan ışığın yüzeye dik olma kuralının esnetilerek yeniden düzenlenmiş bir versiyonudur (Frisvad et al., 2014). Bu model, Monte Carlo simülasyonuna dayanmadan tekli saçılmayı içeren standart Dipol yöntemi kadar verimli sonuçlar üretmektedir. Katmanlı yarı şeffaf malzemeler için geliştirilmiş bir başka yaklaşım da yüksek emilime sahip malzemelerin işlenmesinde kullanılan, tekli ve çoklu saçılmayı birbirinden ayıran niceliksel difüzyon yaklaşımıdır (d'Eon & Irving, 2011).

Dipol yöntemi, cilt gibi çok katmanlı yarı şeffaf malzemelerin modellenmesine olanak sağlayan çok kutuplu bir modelle genişletilmiştir (Donner & Jensen, 2005). Bu yöntem, geniş bir aralıkta bir katılımcı ortam için önceden hesaplanmış BSSRDF verisine dayanan bir modeldir (Donner et al., 2009). Bu yöntemlerin tümü, yüksek emilim durumlarında önemli hatalara maruz kalan klasik difüzyon teorisi yaklaşımını kullanmaktadır (Farrell et al., 1992).

- **Hassas Tekli Saçılma**

Tekli saçılma, hacimli kostikler gibi yüksek frekanslı etkiler üretebilmektedir. Walter ve ekibi tarafından tekli saçılma etkilerinin doğru hesaplanması için Newton Raphson optimizasyonunu kullanan bir yöntem sunulmuştur (Walter et al., 2009). Bu yöntem, bir ortamın içindeki ve dışındaki noktaları birbirine bağlayan yolları hızlı bulmak için yenilikçi bir teknik sunmuştur. Holzschuch, hacimli kostikleri daha hızlı hesaplamak için tekli saçılmaya dayalı bu yöntemi geliştirmiştir (Holzschuch, 2015). Yöntem, her bir üçgen yüzeyin kamera görüş açısı içerisine

girmesini sağlamak için kurulmuştur. Bu sayede yöntemin doğruluğu ve hesaplama hızı artmıştır. Bu algoritma, tekli saçılmalarda referans olarak kullanılmaktadır.

- **Foton Haritası**

Jensen ve Christensen, katılımcı ortam için bir foton haritalama eklentisi geliştirmiştir (Jensen & Christensen, 1998). Yöntem, çift yönlü Monte Carlo ışın izlemeye tekniğine dayanmakta, verimliliği artırmak ve gürültüyü azaltmak için foton haritası kullanmaktadır. Hızlı ve basit olan bu yöntem, aynı zamanda homojen olmayan medya ve anizotropik saçılmayı da hesaplayabilmektedir. Jarosz ve ekibi, foton haritasındaki parlaklığı belirlemek için, kamera aksında bir ışın kullanarak algoritmayı genişletmişlerdir (Jarosz et al., 2008). Böylece daha hızlı hesaplamalar ve daha az gürültülü görüntüler elde edilmiştir.

Katılımcı ortamlarda ışın taşınımının hesaplanması, ortam yoğunluğu, saçılma oranı ve anizotropi gibi değişkenlerle ilişkilendirilen oldukça karmaşık bir süreçtir. Birçok özel işleme tekniği, belirli ortamlardaki ışık taşınım sorunlarını etkili bir şekilde çözebilse de bazı alt sorunlar hala çözüm beklemektedir. Bu amaçla Křivánek ve ekibi tarafından ışık taşıma denklemindeki ışınlar, noktalar ve ışık yolları arasında otomatik seçim yapabilen bir algoritma tanıtılmıştır (Křivánek et al., 2014).

Son dönemde birçok araştırmada hesap yöntemleri, hacimsel yoğunluk tahmini üzerine kurulmuştur. Bitterli ve Jarosz, foton düzlemleri ve foton hacimlerini kullanarak algoritmayı genişletmiştir (Bitterli & Jarosz, 2017). Algoritma, foton haritası yerine çift yönlü yol izleme yöntemi ile çalışmaktadır.

- **Nokta Tabanlı Küresel Aydınlatma**

Christensen, Z-buffer yaklaşımından esinlenerek, nokta tabanlı küresel aydınlatmayı tanıtmıştır (Christensen, 2008). Bu yöntem, noktaların hiyerarşisini kullanarak dağınık ışık taşınımını hesaplamaktadır. Arbree ve ekibi bu yaklaşımı yüzey altı saçılımı için uyarlamıştır (Arbree et al., 2008). Bu algoritma, aynı anda hem yüzey ışımasını hem de yüzey altı saçılmasını hiyerarşik tahminlerle optimize etmektedir. Bunun üzerine nokta ışıklar yerine Gauss küresel ışık kaynakları kullanan yeni bir yaklaşım öne sürülmüştür (Yan et al., 2012). Her iki yaklaşım da çoklu saçılma etkilerinin baskın olduğu yüksek yansıma oranına sahip malzemelerde etkilidir.

- **Sanal Nokta Işıkları**

Keller, hızlı küresel aydınlatma için sanal nokta ışık yöntemini önermiştir (Keller, 1997). Daha sonra Hasan ve ekibi, aydınlatmadaki aşırı parlaklığı önlemek için sanal küresel ışık (*VSL – Virtual Spherical Light*) yöntemini geliştirmiştir (Hašan et al., 2009). Yeni bir ışık türü olan sanal küresel ışık VSL sistemi, birçok aydınlatma algoritmasındaki doğruluk sınırlarını ortadan kaldırmıştır. Novak ve ekibi, yarı şeffaf malzemeler içindeki ışık taşınımını modellemek için sanal noktaları (*VPL – Virtual Point Light*) ve sanal ışın ışınlarını (*VRL – Virtual Ray Light*) kullanmışlardır (Novák et al., 2012). Bu gelişmelerin ardından, Walter ve ekibi sanal ışıkların kümelenmesini sağlayan ve hesaplamalarda büyük bir hızlanma yaratan ışık kesme tekniğini tanıtmıştır (Walter et al., 2005). Işık kesme tekniği, gerçekçi aydınlatma hesaplamalarında ölçeklenebilir bir sınır tanımlamıştır. Bu sayede, rastgele geometri, dağınık olmayan malzemeler, noktasal ve alan ışıkları, HDR ortam haritaları, güneş ve gökyüzü modelleri gibi çok çeşitli ışık kaynakları işlenebilmektedir. Daha sonraki çalışmalarda ışık kesme yöntemi, ışık ve alıcı çiftlerini içerek şekilde genişletilmiştir (Walter et al., 2006). Yöntem, ayna yansıması ve yüzey altı saçılmasını hesaplayacak şekilde geliştirilmiştir (Walter et al., 2012).

- **Etkileşimli / Gerçek Zamanlı Saçılma**

Kaplanyan ve Dachsbacher, video oyunları gibi gerçek zamanlı uygulamalarda dinamik sahnelerde dolaylı aydınlatmayı yaklaşık olarak hesaplayabilen ölçeklenebilir bir teknik geliştirmiştir (Kaplanyan & Dachsbacher, 2010). Bu yöntem, sahnedeki ışığın mekânsal ve açısal dağılımını temsil etmek için kafes yapıları ve harmonikler içeren hiyerarşik bir yaklaşım kullanmaktadır. Benzer şekilde Delalandre ve ekibi, katılımcı ortamlarda tekli saçılmanın hızlı bir tahmini için genel bir yöntem önermiştir (Delalandre et al., 2011).

Hacimsel kostikler, ışığın önce yansıtıcı bir yüzeyle etkileşime girmesi ve ardından katılımcı bir ortamda dağılmasıyla oluşan karmaşık aydınlatma desenleridir. Bu doğrultuda, tekli saçılma özelliğine sahip katılımcı ortamlarda hacimsel kostikleri simüle edebilen yeni bir yöntem sunulmuştur (Hu et al., 2010).

Xu ve ekibi ise homojen yarı şeffaf malzemelerin gerçek zamanlı görselleştirilmesine yönelik bir yöntem önermiştir (Xu et al., 2007). Bu yaklaşım

hem tekli hem de çoklu saçılmayı kapsayan tam analitik bir BSSRDF modelinde önceden hesaplanmış ışınım transfer tekniklerinden yararlanmaktadır. Benzer bir yöntem Zhang ve ekibi tarafında geliştirilmiş olup, foton haritalama tekniğinin daha önce hesaplanan ışınım transfer denklemiyle birleştirilmesine dayanmaktadır (Zhang et al., 2013).

1.2 Tezin Amacı

Sıvıların emilim ve saçılım değerlerinin doğru bir şekilde modellemesi, küresel aydınlatma algoritmalarının bir parçası olarak, fotogerçekçi görüntülerin üretilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu durum, özellikle su, cam gibi şeffaf malzemeler ile çeşitli sıvıları içeren sahnelerde görsel gerçekçiliği artırmak için büyük önem taşımaktadır. Işığın herhangi bir malzemeyle etkileşimi, gelen ışığın ve malzemenin optik özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler, ışığın malzemenin içinden geçişini, yayılımını ve emilimini kontrol etmektedir.

Bu bağlamda çalışmanın amaçları:

- Gerçekçi görüntü sentezi yapan yazılımların, gerçek dünyadaki fiziksel olguları daha doğru bir şekilde yansıtabilmesi için, tüm hesaplamalarda şeffaf ve yarı şeffaf malzemelerin emilim ve saçılım katsayılarının göz önünde bulundurulması gerekliliğini ortaya koymaktır.
- Ölçülebilir yapay görüntüler oluşturmaktır.

Araştırma konusu, yapı fiziği, yapı bilgi modelleme ve malzeme analizi gibi alanları içermesine rağmen sadece mimari görselleştirme ile sınırlandırılmıştır.

1.3 Hipotez

Işık madde etkileşiminin temel prensipleri anlaşılmış olsa da verimli hesaplama hala zorlu bir sorundur. Mimari görselleştirmede gerçekçi görüntü işleme yazılımları, genellikle sis, duman, ateş ve atmosferik efektler gibi karmaşık olgular dışındaki hesaplamalarda yüzey aydınlatma modellerini kullanmaktadır. Bu yaklaşım, hesaplamaların daha hızlı yapılmasını sağlıyor olsa da ışık madde etkileşimden kaynaklanan bazı fiziksel etkiler yüzey aydınlatma modellerinde yer almamaktadır. Hacimsel hesaplamalarda yer alan emilim, saçılım ve iletim gibi olgular, malzemelerin fiziksel özelliklerinin doğru biçimde tanımlanmasında kritik

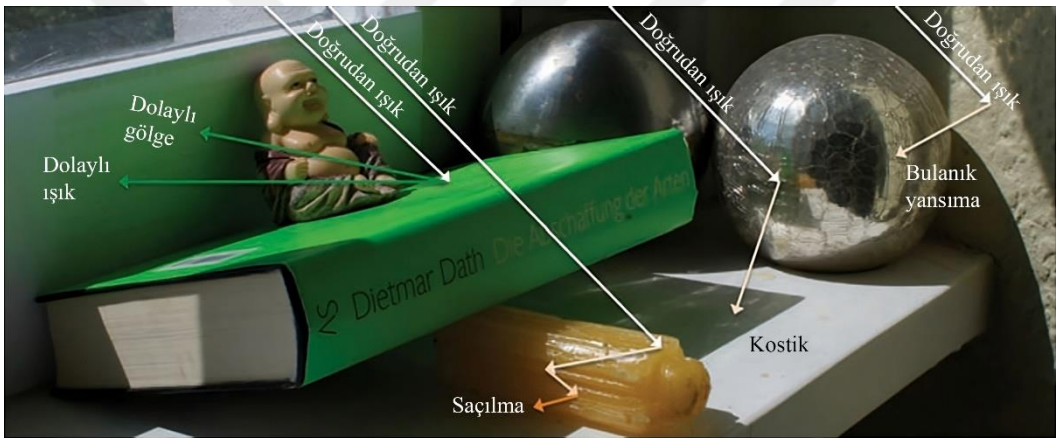
öneme sahiptir. Bu nedenle; fiziksel gerçekliğe daha yakın sonuçlar elde etmek için yüzey ve hacimsel hesaplama yöntemlerinin entegrasyonu ve birlikte kullanımı gereklidir.

Bu çalışmanın hipotezleri:

- Gerçekçi görüntü sentezi yazılımlarında katılımcı medya tabanlı aydınlatma modelleri kullanılarak hesaplamalara emilim ve saçılım katsayıları dahil edilebilir.
- Katılımcı medya tabanlı aydınlatma modelleri aracılığıyla, her sıvı malzeme için önceden ölçülmüş emilim ve saçılım değerleri tanımlanabilir.

2
KÜRESEL AYDINLATMA MODELLERİ VE ALGORİTMALAR

Küresel aydınlatma, üç boyutlu sahnelerde daha gerçekçi aydınlatmayı hedefleyen bir dizi algoritmanın genel adıdır. Bu tür algoritmalar, yalnızca doğrudan ışık kaynağından gelen ışığı değil, sahnedeki diğer yüzeylerden yansıyan, kırılan ve yutulan ışığı da hesaplamaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Küresel aydınlatmalı bir sahnenin fotoğrafı: çoklu dağınık ve aynasal sıçramalar, kostik ve saçılmalar (Ritschel et al., 2012)

Küresel aydınlatma, ışık ile nesneler arasındaki etkileşim sonucu yüzeylerde meydana gelen çoklu yansıma ve kırılmaları dikkate alan bir hesaplama sürecidir. Yüksek doğruluk elde edilebilmesi için bu yaklaşımın, temel fiziksel prensiplere dayalı modellerle desteklenmesi gerekmektedir. Başka bir ifadeyle, malzemelerin yansıma özelliklerinin uygun iki yönlü yansıma dağılım fonksiyonları (BRDF) ile tanımlanması, ışık kaynaklarının radyometrik açıdan doğru biçimde modellenmesi, sahne genelindeki ışık iletiminin hassas şekilde hesaplanması ve görüntüde uygun ton eşleme operatörlerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır.

Küresel aydınlatma algoritmaları, üç boyutlu bir sahnede ışık iletiminin gerçekçi hesaplanmasıyla ilgilenmektedir. Gerçek dünyada yüzeyler yalnızca doğrudan ışık

kaynaklarından değil, diğer yüzeylerden yansıyan ışık dolaylı ışık ile de aydınlatılır. Küresel aydınlatma kavramı, bu dolaylı aydınlatmayı dikkate almayı amaçlamaktadır. Teoride olarak, bir sahnedeki her nesne diğer tüm nesneleri etkileyebilir; bu durum, küresel aydınlatmayı çözülmesi güç bir problem haline getirmektedir.

Küresel aydınlatma ile ilgili yapılan en yaygın araştırma konusu, dolaylı dağınık aydınlatmanın hesaplanmasıdır. Bu amaçla geliştirilen ilk algoritma, Cornell Üniversitesi araştırmacıları tarafından 1984'te yayımlanan ve sonlu elemanlar yöntemine dayanan radyosite (*radiosity*) algoritmasıdır (Goral et al., 1984). Radyosite, ışın izleme, koni izleme, yol izleme, Metropolis ışık iletimi, foton eşleme ve görüntü tabanlı aydınlatma, küresel aydınlatmada en çok kullanılan algoritmalar arasında yer almaktadır. Bazı durumlarda, bu algoritmaların birlikte kullanılması daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak hesaplamalar süreleri, elde edilen doğruluk kadar başarılı değildir.

Küresel aydınlatma algoritmalarının başarıyla uygulanabilmesi, ışığın temel davranışlarını ve yüzeylerle etkileşimini doğru bir biçimde modellemeye dayanmaktadır. Bu nedenle, aydınlatma teorisinin fiziksel temellerini anlamak, gerçekçi sahneler oluşturabilmek için kritik bir öneme sahiptir.

2.1 Aydınlatma Teorisinin Temelleri

Işığın davranışını ve yüzeylerle etkileşimini açıklamak için üç ışık modeli geliştirilmiştir. Gerçekçi sanal sahneler gerçekçi oluşturabilmek için, ışığın fiziksel özelliklerinin ve davranışlarının doğru bir şekilde taklit etmek gerekmektedir. Bu bağlamda, bilgisayar grafikleri, elektromanyetik radyasyonun nicel değerlendirmesini yapan ve fizik biliminin bir dalı olan radyometri alanından büyük ölçüde yararlanmaktadır.

Küresel aydınlatma ve ışık ile nesneler arasındaki etkileşimlerin doğru şekilde modellenmesi, ışığın temel davranışlarını açıklayan teorik modellerin anlaşılmasını gerektirir. Bu nedenle, ışık optiği, dalga optiği ve kuantum optik gibi farklı modelleri bilgisayar grafiklerinde gerçekçi sahneler oluşturmak için temel bir referans olmaktadır.

- **Işık Modelleri**

Günümüzde ışık modelleri, fiziksel temellere dayanarak geliştirilmiştir.

Işın optiği: Işın optiği, ışığın farklı optik ortamlarda, belirli geometrik kurallara göre hareket eden bağımsız ışınlar şeklinde modellenmesini sağlar. Geometrik optik olarak da bilinen bu yaklaşım; yansıma, kırılma ve görüntü oluşumu gibi birçok olguyu açıklamak için kullanılmaktadır. Bu modelde ışığın doğrusal bir yol izlediği ve sonsuz bir hızla hareket ettiği varsayılmaktadır.

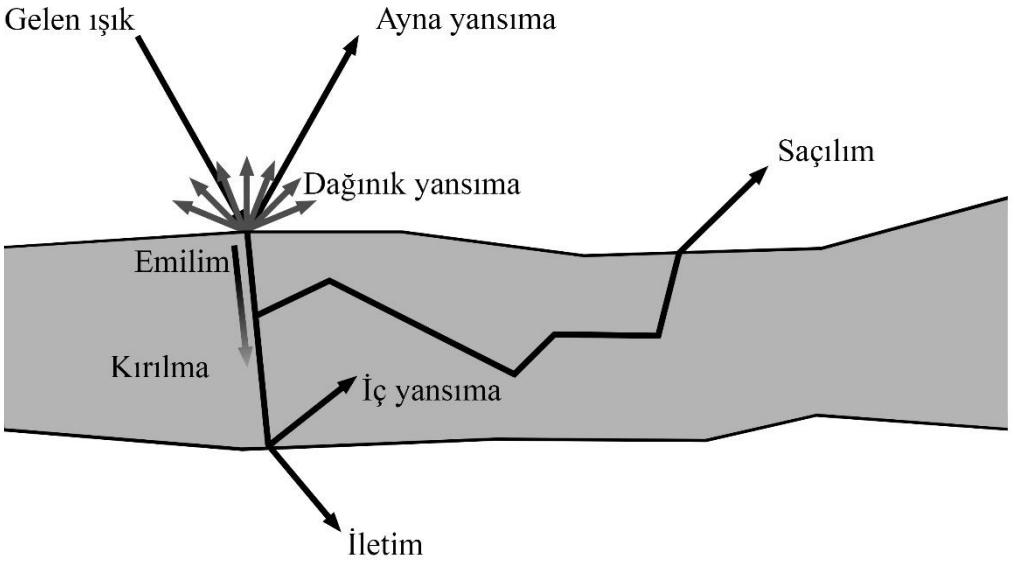
Dalga optiği: Dalga optiği, ışığın elektromanyetik dalga özelliklerini inceleyen bir bilim dalıdır. Fiziksel optik olarak da adlandırılan bu alan, ışın optiğiyle açıklanan fenomenlere ek olarak, kırınım, girişim, polarizasyon ve dağılım gibi olguları da modelleyebilmektedir. Ancak, ışığın dalga yapısından kaynaklanan karmaşıklıklar nedeniyle dalga optiği, genellikle bilgisayar grafiklerinde görüntü oluşturma hesaplamalarında göz ardı edilmektedir.

Kuantum optik: Kuantum optik, ışığın hem dalga hem de parçacık doğasına ilişkin temel bir model sunar. Bu model, ışığın davranışını mikroskobik ölçekte, yani elektron seviyesinde açıklama yeteneğine sahiptir. Ancak, içerdiği detaylı analizler ve yüksek hesaplama nedeniyle günlük uygulamalarda yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Bilgisayar grafiklerinde en yaygın kullanılan model, genellikle insan gözü tarafından görülebilen ışık olaylarının çoğunu temsil edebilmesi nedeniyle geometrik optiktir. Dalga karakteristiğinin neden olduğu diğer mikro optik etkiler, yüksek işlem gücü gerektirdiği için göz ardı edilmektedir. Bununla birlikte, geometrik optiğin modelleyemediği belirgin ışık efektlerinin simülasyonu için dalga optiğinin kullanılması gerekebilir.

- **Işık ve Madde Etkileşimi**

Işık, sürekli bir dalga boyu aralığına sahip olarak tanımlanır. Belirli bir dalga boyuna sahip bir ışık, bir malzeme yüzeyine ulaştığında, üç temel etkileşimden birisi gerçekleşir: iletim (*transmission*), emilim (*absorption*) ve saçılma/yansıma (*scattering/reflection*) (Şekil 2.2). Işığın frekansı, atom elektronlarının doğal titreşim frekansıyla eşleşirse, ışık emilir ve enerjisi titreşim hareketine dönüşür; bu da ısı olarak algılanır. Frekans eşleşmediğinde ise ışık, yansıma ya da iletim yoluyla yeniden yayılır (Lanier, 2018).



Şekil 2.2 Işık ve madde etkileşimi (Ganovelli et al., 2015)

Emilim (absorption): Emilim, ışık dalgalarının nesne tarafından yutulmasıdır. Elektronların titreşim hareketi belirli doğal frekanslarda gerçekleşir. Işık dalgası, nesnenin doğal frekansına eşleştiğinde enerji titreşime dönüşür ve ısı oluşur. Emilim, maddelerin bileşimi ve miktarı hakkında bilgi sağlayabilir; bu nedenle absorpsiyon spektrumları analitik kimya ve astronomide önemli bir araçtır.

Yansıma (reflection): Işığın frekansı, nesnenin doğal frekansıyla eşleşmediğinde ışık yansır. Bu durumda elektronlar kısa süreli ve düzensiz titreşimler gösterir. Yansıma ile emilim arasındaki temel fark, ışığın frekansı ile nesnedeki elektronların doğal frekansının uyumudur.

İletim (transmission) ve kırılma (refraction): İletim, ışığın bir nesnenin içinden geçip diğer tarafından çıkmasıdır. Kırılma, ışık dalgalarının malzemeden geçerken hızlarının değişmesi ve hareket ettikleri açının değişmesidir. Şeffaf malzemeler ışığı iletir; kırılma ise iletilen ışığın yönünü değiştirir.

Sonuç olarak, ışığın maddeyle etkileşimi; emilim (*absorption*), yansıma (*reflection*) ve iletim/kırılma (*transmission/refraction*) gibi temel süreçler üzerinden açıklanabilmektedir. Bu etkileşimler, ışığın fiziksel davranışını anlamanın yanı sıra, bilgisayar grafiklerinde gerçekçi görüntüleme tekniklerinin geliştirilmesinde de kritik bir rol oynamaktadır.

2.2 Radyometrik ve Fotometrik Büyüklükler

Radyometri, görünür ışık dahil olmak üzere elektromanyetik spektrumun tamamıyla ilgilenen ve radyasyon ölçümünü inceleyen bir alandır (Cohen & Wallace, 1993). Elektromanyetik enerjinin fiziksel ölçüm bilimi olarak tanımlanan radyometri, enerji ve güç büyüklüklerini SI birimlerinde (joule ve watt) ifade eder. Bir ışık kaynağının her dalga boyundaki enerjisi spektroradyometre ile ölçülerek tayfsal enerji dağılımı belirlenebilir.

Buna karşılık, fotometri ise elektromanyetik spektrumun yalnızca insan görme sistemi tarafından algılanabilen bölgesine odaklanır ve ışığın psikofiziksel olarak ölçülmesini sağlayan bilim dalıdır. İnsan gözü yalnızca 380-780 nm arasındaki dalga boylarına duyarlıdır. Bu nedenle, farklı tayfsal enerji dağılımlarına sahip ışık kaynakları gözümüzde farklı renkler olarak algılanır.

Bilgisayar grafiklerinde fotogerçekçi görüntüleme, radyometrik ölçümlere dayanır. Bu yaklaşımla, yüzey noktalarındaki ışık yoğunlukları hesaplanarak gölgelendirme ve aydınlatma etkileri oluşturulur. Işık elektromanyetik spektrumun bir parçası olduğundan, radyometri fotogerçekçi görüntüleme çalışmalarında bir temel sunmaktadır (Wang, 2022).

Bu bağlamında, dört temel büyüklük ele alınmaktadır:

Işık akısı (Φ, luminous flux): Bir kaynaktan belirli bir süre boyunca yayılan toplam ışık miktarıdır. Radyometrik karşılığı watt (W), fotometrik birimi lümen (lm) olarak tanımlanmaktadır (Tablo 2.1).

Işık şiddeti (I, intensity): Belirli bir yöndeki birim katı açı başına düşen ışık akısıdır. Radyometrik karşılığı watt/steradyan (W/sr), fotometrik birimi candela (cd = lm/sr) olarak ifade edilmektedir. (Tablo 2.1).

Aydınlık düzeyi (E, illuminance): Bir yüzeye düşen ışık akısı yoğunluğudur. Radyometrik karşılığı watt/metrekare (W/m^2), fotometrik birimi lux ($lx = lm/m^2$) olarak tanımlanmaktadır. (Tablo 2.1).

Işıklılık (L, luminance): Belirli bir yöndeki birim alandan yayılan ya da yansıyan ışık akısıdır. Radyometrik karşılığı watt/($m^2 \cdot sr$), fotometrik birimi candela/metrekare (cd/m^2) olarak ifade edilmektedir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Radyometrik ve fotometrik büyüklükler

Büyüklük	**Radyometrik karşılık**	**Radyometrik birim**	**Fotometrik karşılık**	**Fotometrik birim**
Işık akısı (Φ)	Radiant flux (Φ_e)	Watt (W)	Luminous flux (Φ_v)	Lumen (lm)
Işık şiddeti (I)	Radiant intensity (I_e)	Watt/steradyan (W/sr)	Luminous intensity (I_v)	Candela (cd = lm/sr)
Aydınlık düzeyi (E)	Irradiance (E_e)	Watt/metrekare (W/m^2)	Illuminance (E_v)	Lux ($lx = lm/m^2$
Işıklılık (L)	Radiance (L_e)	Watt/($m^2 \cdot sr$)	Luminance (L_v)	Candela/metrekare (cd/m^2)

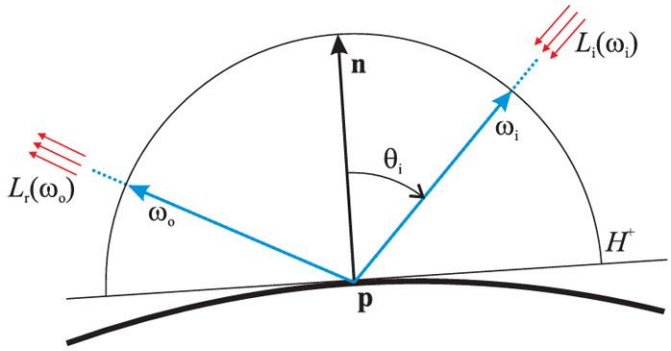
Radyometrik birimler tüm elektromanyetik spektrumu kapsarken, fotometrik birimler yalnızca insan gözünün algılayabildiği görünür ışık spektrumuna göre düzenlenir. Bu nedenle, radyometrik ve fotometrik birimler birbirinden farklıdır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1, radyometrik ve fotometrik büyüklüklerin karşılaştırmalı olarak sunulmasıyla, ışığın fiziksel ölçümü ile algısal temelli ölçümü arasındaki temel ayrımı ortaya koymaktadır. Tablo simgelerindeki **"e"** harfi radyometrik (enerji temelli) büyüklükleri, **"v"** harfi ise fotometrik (görsel algıya dayalı) büyüklükleri ifade etmektedir.

Radyometrik büyüklükler, BRDF ve küresel aydınlatma hesaplamalarının temel kavramlarını oluşturmaktadır (Tablo 2.2). Bu büyüklüklerin yüzeyler üzerindeki dağılımını ve yönlü yoğunluk ilişkilerini daha sistematik bir biçimde inceleyebilmek amacıyla, ışınım ve ışıklılık değerleri matematiksel ifadelerle tanımlanmıştır.

Tablo 2.2 Radyometrik büyüklükler ve formül ifadeleri

Büyüklük	**Sembol**	**Birim (SI)**	**Formül ifadesi**
Radyant akı	Φ	W (watt)	$\boldsymbol{\Phi = \frac{dQ}{dt}}$
Işınım (irradiance)	E(p)	W/m²	$\boldsymbol{E(p) = \frac{d\Phi(p)}{dA}}$
Radiance (yönlü yoğunluk)	L(p, ω)	W/(m²·sr)	$\boldsymbol{L(\mathbf{p},\omega) = \frac{\mathbf{d^2\Phi(p},\omega)}{\mathbf{dA}\,\mathbf{d}\omega\,\cos\theta} = \frac{\mathbf{dE(p},\omega)}{\mathbf{d}\omega\,\cos\theta}}$



Şekil 2.3 p noktasındaki BRDF, gelen ışık yönü ωi'den gelen ışığın, giden ışık yönü ωo'ya doğru yansıyan ışığın yüzdesini verir (Křivánek & Gautron, 2009).

Aydınlık düzeyi, radyasyonun geldiği yönden bağımsız olarak bir yüzeye gelen radyasyonun mekânsal yoğunluğunu tanımlar. Işınım değeri, yüzey elemanı dA'nın yönelimine bağlıdır. Özellikle, yalnızca p'deki yüzey normalinin etrafındaki üst yarımküre H+'dan gelen ışık, p'deki ışınım değerine katkıda bulunur (Şekil 2.3).

$$L(\mathrm{p},\omega) = \frac{\mathrm{d}^2\Phi(\mathrm{p},\omega)}{\mathrm{dA}\,\mathrm{d}\omega\,\cos\theta} = \frac{\mathrm{d}E(\mathrm{p},\omega)}{\mathrm{d}\omega\,\cos\theta} \qquad (2.1)$$

Burada dω diferansiyel bir katı açıdır ve θ yüzey normali ile ω yönü arasındaki açıdır. Kosinüs terimi cosθ, dA'yı ω'ye yansıttığı için, ışıma değerini yüzey elemanı dA'nın karşılıklı yöneliminden ve akı yönü ω'den bağımsız hale getirir.

Işıklılık, parlaklık açısından şu şekilde ifade edilebilir:

$$E(\mathrm{p}) = \int_{H^+} L(\mathrm{p}, \omega) \cos\theta \, d\omega \tag{2.2}$$

Burada H+, p noktasındaki yüzey normalinin merkezinde bulunan üst yarımküredir.

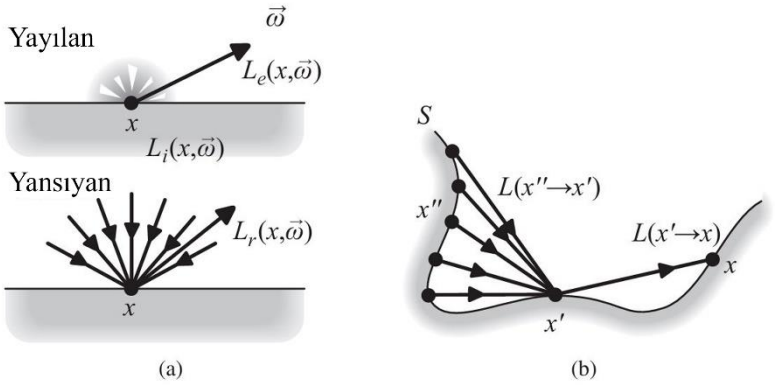
2.3 İşleme Denklemi

Whitted 1979'da orijinal ışın izleme makalesini yayımlamıştır. 1980'lerin başı ve ortası, radyosite yöntemi ve Monte Carlo ışın izleme (MCRT) gibi dolaylı aydınlatma algoritmalarında büyük gelişmelere tanık olmuştur. Jim Kajiya, küresel aydınlatma (GI) problemini 1986'da yayınladığı integral denklemi ile formüle etmiştir (Kajiya, 1986). Bu yaklaşım, sonraki gelişmelere temel oluşturmuştur. Bu denklemin verimli bir şekilde çözümü, o zamandan beri GI araştırmalarının çoğunun nihai hedefi haline gelmiştir. Karmaşık fiziksel olguyu simüle edebilmek için önemli olan, ışık ile nesne arasındaki etkileşimin fiziksel ve matematiksel yapısını anlamaktır. Bu, işleme denklemi adı verilen integral bir denklem ile ifade edilir (Zhang, 2022).

$$L_0(p, \vec{\omega}) = L_e(x, \vec{\omega}) + L_r(x, \vec{\omega}) \tag{2.3}$$

$$L_0(p, \vec{\omega}) = L_e(x, \vec{\omega}) + \int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L_i(x, \vec{\omega}')(\vec{n}'.\vec{\omega}') d\vec{\omega}' \tag{2.4}$$

İşleme denklemi, nesne yüzeyleri arasındaki ışık taşınımını modellemektedir. Belirli bir yöndeki bir noktada bir yüzeyden gelen ışığın ışıklılığı L_0, o noktadan yayılan emisyon özelliğine bağlı ışıklılık L_e ile tüm gelen yönlerden yansıyan ışığın ışıklılık L_r'nin toplamından oluşur. Yansıyan ışıklılık, Denklem (2.4)'de olduğu gibi, yüzey noktasının üzerindeki yönlerin yarım küresi üzerinden gelen ışığın BRDF modele entegre edilmesiyle hesaplanır.



Şekil 2.4 İşleme denklemi geometrisi. (a) bir yüzeyden yayılan ışıklılık, yüzey emisyonu ve yansıyan ışığın toplamından oluşur. (b) Yansıyan ışık, yönlerin yarım küresi yerine sahnedeki tüm görünür yüzey noktalarından alınabilir (Kurachi & Stark, 2011).

Emisyon, yüzeyin bir özelliği olup, aynı zamanda bu yüzeyler ışığı da yansıtmaktadır. İşleme denkleminin bir formu olan Denklem (2.3), görünüşte çok basittir. x noktasında ω yönünde gelen ışık $L_i(x,\vec{\omega}')$, bir ışık kaynağından yayılan ya da başka bir yüzeyden yansıyan ışığı kapsar. Aslında x yüzey noktasından geri yansıyan ışığı içermektedir. Başka bir değişle, $L_i(x,\vec{\omega}')$, $L_r(x,\vec{\omega})$'ye bağlıdır ve bu sonsuz bir döngü içerisinde devam etmektedir. Bu karmaşık karşılıklı bağımlılık, küresel aydınlatmayı bu kadar zorlu bir problem haline getirmektedir (Şekil 2.4).

2.4 Küresel Aydınlatma Algoritmaları

Gerçekçi görüntü sentezinde, ışığın tüm yüzeylerle olan etkileşimi ve enerji transferine küresel aydınlatma denir. Küresel aydınlatmanın temel amacı, ışığın tüm yansımalarını simüle ederek, herhangi bir noktada ışık yoğunluğunu doğru bir şekilde hesaplamaktır. Küresel aydınlatmada en zorlu fenomen, karmaşık yüzey özelliklerini ve yansıma modellerini dikkate alarak dolaylı aydınlatmayı simüle etmektir.

Küresel aydınlatma algoritmaları, ışığın sahnede yayıldığı yolu ve yüzeylerle olan etkileşimini simüle etmek için geliştirilmiş çeşitli yöntemleri içermektedir. Bu yöntemler, sahnedeki ışığın doğruluğunu ve gerçekçiliğini artırmak amacıyla doğrudan ve dolaylı aydınlatmayı farklı şekillerde hesaplamaktadır. Her bir

yöntemin kendine özgü avantajları, sınırlamaları ve uygulamaları alanları bulunmaktadır.

2.4.1 Işın İzleme Yöntemleri

Işın izleme yönteminin temel fikri, ışık kaynakları ile sanal sahnedeki noktalar arasında ışık taşıma yolları oluşturarak piksel başına ışıklılık değerlerini hesaplamaktır. Bu nedenle, yöntem piksel odaklı ya da nokta örneklemeli ışın izleme algoritmaları kategorisine girer.

1980'de geliştirilen temel ışın izleme yöntemi, ışınların ışık kaynaklarından gözlemciye doğru izlenmesi prensibine dayanmaktadır. Turner Whitted tarafından tanıtılan bu algoritma; geleneksel sanatta kullanılan perspektif ve gölge oluşturma prensiplerini temel almaktadır (Whitted, 1980). Yöntem, her piksel için çok sayıda ışın kullanarak doğrudan aydınlatmayı hesaplayabilir ve aynı zamanda gerçekçi ayna yansıma ve kırılma efektlerini oluşturabilir. Bu özellikleri, ışın izlemenin önemli bir araç olmasını sağlamıştır.

Kajiya'nın işleme denkleminden bu yana, küresel aydınlatma araştırmaları, uygun sürede ve belirli doğrulukta gerçekçi görüntüler üretebilen algoritmalar geliştirmeye odaklanmıştır. Bu çalışmalar, Monte Carlo ışın izlemenin en genel ve doğru yaklaşım olduğunu göstermiştir. Monte Carlo yöntemi, piksel başına çok sayıda ışın kullanarak sahnedeki ışığın sıçramalarını ve yüzeyler arasındaki etkileşimleri simüle etmektedir. Özellikle ikincil ışınların sayısını optimize etmek, yöntemin verimli çalışabilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Piksel başına ikincil ışın sayısı, çok sayıda ışık kaynağı ve ayna yansımaların bulunduğu sahnelerde büyük bir sorun olabilir. Bu sorun gölgeleri oluşturan ışınlar için de geçerlidir. Bu nedenle, Haines ve Greenberg her ışık kaynağı için önceden depolanmış bir ışık tamponu önermiştir (Haines & Greenberg, 1986). Bu yaklaşıma paralel olarak, gölge ışınlarını optimize eden başka algoritmalar da geliştirilmiştir (Agrawala et al., 2000; Ward, 1994). Bu yöntemler, sahneyi bir dizi voksel alt bölümlere ayırarak, engellenen, görünen ve kısmen görünen ışık kaynaklarını listeler ve gölge ışınlarının sayısını azaltır.

Işın izleme yönteminde bir diğer yaklaşım, ışın sayısını azaltmanın yanı sıra, her ışının daha hızlı izlenmesini sağlamaktır. Whitted'in belirttiği gibi, ışın izlemede hesaplama sürelerinin çoğu, ışınların sahne geometrisi ile kesişimlerinin

hesaplanmasına harcanmaktadır. Bu nedenle birçok algoritma, ışın geometri kesişimlerini hızlandırmak için geliştirilmiştir (Möller & Trumbore, 2005). Işık izlemeyi hızlandırmanın bir diğer etkili yöntemi, her piksel için ışın kesişimlerinin sayısını azaltmak ve bu verileri hiyerarşik bir veri tabanında depolamaktır. Son yıllarda, pek çok hiyerarşik alt bölümleme yapısı önerilmiş ve hesaplama karmaşıklığını etkili biçimde azaltmıştır (Glassner, 1984; Klimaszewski & Sederberg, 1997; E. P. Lafortune & Willems, 1995).

Sonraki yıllarda, ışın izleme algoritmaları gerçek zamanlı hızlarda çalışacak şekilde optimize edilmiştir (Parker et al., 1999; Pharr et al., 1997).

2.4.2 Sonlu Elemanlar Radyosite Yöntemleri

Radyosite, ilk olarak ısı transferi problemlerinde kullanılan tekniklere dayanan bir sonlu elemanlar yöntemidir (Goral et al., 1984). Bu yöntem, yüzeylerdeki dağınık ışık etkileşimlerini dikkate alarak işleme denklemini çözmeye çalışmaktadır. Radyosite yönteminin önemli bir avantajı, kamera farklı bir konuma taşındığında yüzeylerin ışıklılık değerlerinin yeniden hesaplanmaya gerek olmamasıdır. Ayrıca bu yöntem, enerji korunumu ilkesini sağlamasıyla öne çıkar ve böylece sahnedeki toplam enerji miktarı doğru bir şekilde korunur.

Bunula birlikte, radyosite yalnızca daha önce hesaplanan yüzey ışıklılık verilerini kullanarak çözüm yaptığı için, özellikle hem dağınık hem de ayna yansımaların bulunduğu sahnelerde yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, yüksek çözünürlüklü sahnelerde radyosite matrisinin boyutu çok hızlı büyümekte ve bu da yöntemin önemli bir hesaplama sınırlılığı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Lambertian yüzeyler için, form faktörü hesaplamalarını kullanarak yansımaları verimli bir şekilde hesaplamak amacıyla radyosite yöntemi geliştirilmiştir. Form faktörü denkleminin sayısal entegrasyonunu gerçekleştirmek için ışın tabanlı teknikler önerilmiştir (Sillion & Puech, 1989; Wallace et al., 1989). Daha sonraki çalışmalarda, radyosite çözümü aşamalı iyileştirme yaklaşımıyla yeniden formüle edilmiştir (Cohen et al., 1988)

Algoritmanın verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilen bu teknikler, hesaplama süresini ve yöntem karmaşıklığını azaltmakla birlikte, çözümün doğruluğunda bir miktar düşüşe yol açmaktadır (Hanrahan et al., 1991; Smits et al., 1992, 1994). Günümüzde ise radyosite, tek başına nadiren kullanılmakla birlikte, özellikle karma

algoritmalarda ve ön hesaplama gerektiren sahne aydınlatmalarında önemli bir rol oynamaya devam etmektedir.

2.4.3 Monte Carlo Yol İzleme Yöntemleri

Cook ve ekibi, hareket bulanıklığı, alan derinliği, yumuşak gölgeler ve ayna yansımaları gibi karmaşık görsel etkileri simüle etmek amacıyla stokastik bir ışın izleme tekniği geliştirmiştir (Cook et al., 1984). Ardından Kajiya, işleme denklemini genelleştirerek Monte Carlo yol izlemenin yüzeyler arasındaki kostikler ve çoklu yansımalar da dahil olmak üzere tüm optik olayları simüle edebilmesini sağlamıştır.

Arvo ve Kirk, stokastik yol izleme için bazı istatistiksel teknikler önermiş, özellikle özyinelemeli izlemeyi sonlandırmak amacıyla kullanılan Rus ruleti yöntemi bu teknikler arasında öne çıkmıştır (Arvo & Kirk, 1990). Yol izlemenin en eksiksiz çözümlerinden biri ise ışığın hem gözlemci konumundan hem de ışık kaynağından aynı anda izlenmesine dayanan çift yönlü yol izleme yöntemidir (Veach & Guibas, 1995a). Ancak bu yöntem de işlenmiş görüntülerde görülen gürültü problemini tam olarak ortadan kaldıramamıştır.

Gürültüyü azaltmak ve hesaplama verimliliğini artırmak amacıyla sonraki yıllarda birçok iyileştirme önerilmiştir. Bunlar arasında gelişmiş örnekleme teknikleri, temel aydınlatma koşullarını dikkate alan algoritmalar ve özellikle Metropolis ışık taşımacılığı öne çıkmaktadır (Shirley, 1992; Veach & Guibas, 1995b, 1997).

Monte Carlo yol izlemenin en önemli avantajı, ışık taşınımını fiziksel olarak doğru bir biçimde simüle edebilmesi ve karmaşık optik fenomenleri kapsayabilmesidir. Bununla birlikte, yöntemin en büyük sınırlılığı yüksek hesaplama maliyeti ve örnekleme tabanlı yapısı nedeniyle ortaya çıkan gürültüdür. Bu sebeple Monte Carlo tabanlı algoritmalar, genellikle gürültü azaltma teknikleri ve hızlandırıcı yapılarla birlikte kullanılmaktadır.

2.4.4 Hibrit Yöntemler

Hibrit yöntemler, farklı aydınlatma tekniklerini tek bir algoritmada birleştiren yaklaşımlardır. Genellikle ışın izleme ve radyosite yöntemlerinin kombinasyonlarını içerir. Işın izleme algoritması, piksel ile ışık kaynakları arasındaki yolları takip ederek her pikselin ışıklılık değerini hesaplar, radyosite yöntemi ise sahnedeki her bir öge için ışıklılık değerini belirlemektedir. Hibrit

yöntemler, her iki yöntemin güçlü yönlerini bir araya getirmektedir. Işın izleme ayna yansımada, radyosite ise dağınık yansımada daha başarılı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle hibrit yöntemler, her iki yöntemin avantajlarını birleştiren etkili çözümler olarak öne çıkmaktadır.

İlk hibrit yöntemler, ayna yansıma oluşturmak için ışın izleme yönteminin, dağınık yansımalar için ise radyosite yönteminin kullanıldığı algoritmalardı (Sillion & Puech, 1989; Wallace et al., 1989). Daha sonra ışın izleme, gözle görülen gölgeleri hesaplamak ve kostik efektleri oluşturmak için genişletilmiştir. Bu kapsamda aydınlatma haritalarında ışın izleme kullanılmıştır. Birçok araştırmacı, kostik efektler dışında tüm ışık saçılmalarını hesaplamak için yol izleme tekniklerini tercih etmişlerdir. Bu karşılık dağınık yüzeylerdeki üzerindeki dolaylı aydınlatmayı hesaplamak için yalnızca radyosite kullanılmıştır.

Shirley, dolaylı aydınlatmanın daha hızlı çözümlenmesi amacıyla önceden hesaplanmış üç geçişli bir işleme yöntemi önermiştir. Pek çok araştırmacı, radyosite algoritmasında belirgin hatalar fark etmiş ve tüm ışık saçılma türlerini doğrudan hesaba katmak amacıyla yol izleme yöntemine yönelmiştir. Bu algoritmalar, dağınık yüzeylerin dolaylı aydınlatmasını hesaplamak için radyosite yöntemini; son görüntüdeki ayrıntılar elde etmek için ise Monte Carlo ışın izleme tekniğini kullanmıştır (Smits et al., 1992; Wallace et al., 1987).

Parçacık izleme (*particle tracing*), aydınlatmayı temsil eden noktaları oluşturmak için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu algoritma, foton haritası noktalarını kaynak olarak kullanan ışın izleme tabanlı bir yöntemdir. Yol izleme yöntemine göre farkı, her nokta parçacığın bir ışık enerjisi taşımasıdır.

Monte Carlo yöntemleri, yüksek kalitedeki görüntüleri üretirken genellikle uzun hesaplama süreleri gerektirir. Dolaylı aydınlatmayı hızlandırmak amacıyla, Ward ve ekibi bir ışınım önbellek şeması önermiştir. Bu yöntem, ışıklılık ve ışık yoğunluğu değerlerinin yeniden kullanılması sağlamaktadır (Ward et al., 1988).

2.4.5 Foton Haritalama (Çoklu Geçiş) Yöntemleri

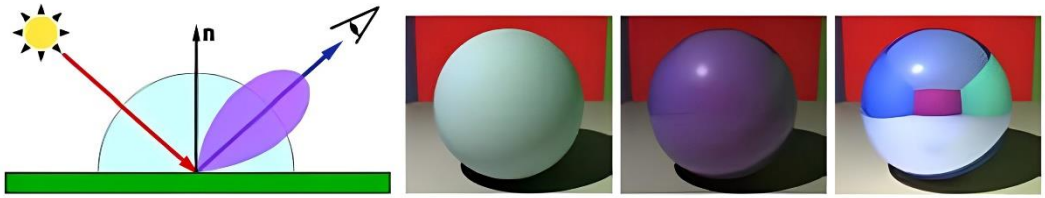
Foton haritalama, hibrit yöntemlerden farklı bir yaklaşımı benimsemektedir. Ana fikir aydınlatma bilgisini geometriyle doğrudan birleştirmek yerine, bu bilgileri ayrı bir foton haritası üzerinde saklamaktır. Bu nedenle yöntem iki geçişli bir yapıya sahiptir. (Jensen, 1995, 1996). İlk geçişte, ışık kaynağından sahne yüzeylerine

düşen fotonlar haritalanır. İkinci geçişte ise, foton haritasında depolanan bilgiler, görüntü işleme algoritmaları tarafından kullanılır. Diğer çift yönlü yol izleme yöntemlerinden farklı olarak, depolanan foton değerlerinin tekrar kullanılabilmesi, foton haritalama yönteminin önemli bir avantajıdır.

Bu yöntem, kostik efektler, dağınık yansımalar ve yüzey altı saçılması (*subsurface scattering*) gibi özel optik olaylarda verimli ve doğru sonuçlar sağlamaktadır. (Veach & Guibas, 1995a).

2.5 BRDF Tabanlı Aydınlatma Modeli

BRDF (İki Yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu), bir yüzeye gelen ışığın bu yüzeyden yansıma açısını ve yoğunluğunu tanımlayan matematiksel bir fonksiyondur. Işığın yüzeye çarptığı noktadan yansıyarak farklı yönlere dağılmasını belirleyerek yüzeyin optik özelliklerini analiz eder (Zhou, 2023). BRDF, malzemenin mat, parlak, metalik veya yarı saydam gibi fiziksel karakteristiklerini simüle eder ve böylece bilgisayar grafikleri ile işleme süreçlerinde gerçekçi görselleştirmeler elde edilmesini sağlar. Bu fonksiyon hem doğrudan hem de dolaylı aydınlatmayı hesaplamada önemli bir rol oynar. BRDF tabanlı aydınlatma modelleri, ışığın yüzeyin dokusu ve mikro yapılarıyla etkileşimlerini dikkate alarak sahnelerdeki yansımaların gerçekçiliğini artırır(Guarnera et al., 2016).



Şekil 2.5 Işığın temel yansıma modelleri (Goral et al., 1984).

Gerçek dünyadaki nesnelerin görüntüsü, ortamdaki ışığın nesne yüzeyinden yansıyarak gözümüze ulaşması ile oluşur. BRDF, bir yüzeye gelen ışık ile yansıyan ışık arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir fonksiyondur (Şekil 2.5). Matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$f_r(p, \omega_i, \omega_0) = \frac{\mathrm{d}L_0(p, \omega_0)}{\mathrm{d}E_i(p, \omega_i)} = \frac{dL_0(p, \omega_0)}{L_i(p, \omega_i) \cos\theta_i d\omega_i} \quad (2.5)$$

Bu denklemde:

$f_r(p, \omega_i, \omega_0)$ BRDF'yi temsil eder,

p cismin yüzeyindeki bir nokta

ω_i gelen ışık yönü, ω_0 gözlemci ya da yansıyan ışık yönüdür,

$\mathrm{d}L_0(p, \omega_0)$, ω_0 yönündeki yüzeyin diferansiyel yansıyan ışıklılığıdır,

$\mathrm{d}E_i(p, \omega_i)$, gelen ışık yönü ω_i den yüzeye düşen diferansiyel ışıklılıktır,

θ_i, gelen ışık yönü ile yüzey normali arasındaki açıdır.

Tüm yarı küresel yüzey üzerinde integral alarak:

$$L_0(p, \omega_0) = \int_\Omega f_r\,(p, \omega_i, \omega_0) L_i(p, \omega_i) \cos\theta_i d\omega_i \quad (2.6)$$

Genel olarak BRDF, gelen ışık yönüne göre nesnenin yüzeyinden yansıyan ışığın dağılımını tanımlar. Bilgisayar grafiklerinde BRDF, üç bileşenin her birinin kendi $f_r(p, \omega_i, \omega_0)$ fonksiyonuna sahip olduğu bir RGB vektörü olarak temsil edilir.

BRDF'nin geri dönüşümlülük, enerji korunumu ve doğrusallık olmak üzere üç temel özelliği vardır.

Geri dönüşümlülük: Gelen ve yansıyan ışığın değiştirilmesinin BRDF değerini değiştirmeyeceğini belirten Helmholtz Karşılıklılık İlkesine dayanmaktadır:

$$L_0(p, \omega_{i,} \omega_0) = L_0(p, \omega_{0,} \omega_i) \quad (2.7)$$

Enerjinin korunumu: BRDF ayrıca enerji korunumu ilkesine tabidir. Yansıyan enerjinin, gelen enerjiyi aşamayacağını açıklamaktadır. Enerji korunumu denklemi aşağıdaki gibidir (Q karşılık gelen enerjiyi temsil eder):

$$Q_{gelen} = Q_{yansıyan} + Q_{emilen} + Q_{iletilen} \quad (2.8)$$

Dolayısıyla şu sonuca varılabilir:

$$Q_{yansıyan} \leq Q_{gelen} \tag{2.9}$$

Dolayısıyla BRDF, enerji korunumu özelliğine ilişkin olarak aşağıdaki integral eşitsizliği sağlamalıdır:

$$\forall \omega_i, \int_{\Omega} f_r(p, \omega_i, \omega_0) \cos\theta_i d\omega_i \leq 1 \tag{2.10}$$

Doğrusallık: Toplam yansıyan ışık, yüzeydeki bir noktadan hesaplanan her bir BRDF yansımasının toplamıdır. Örneğin ayna ve dağınık yansımalar, birden fazla BRDF hesabıyla elde edilir.

BRDF'yi daha verimli kullanmak ve görselleştirmede gerçekçiliği artırmak amacıyla, parametrik modellere ayırmak, önemli bir gelişmedir. Bu bağlamda, deneysel modeller, sayısal modeller ve veri odaklı modeller arasındaki farklar öne çıkmaktadır.

2.5.1 Deneysel Modeller

Deneysel modeller, genellikle yansıyan ışığın hızlı hesaplanması için basit formüller sunmaktadır. Bu modeller, gözlemlere dayalı parametreler kullanarak fiziksel gerçekliğe yakın sonuçlar üretmektedir. Örneğin, Lambertian yansıma ya da Phong modeli gibi temel yaklaşımlar, deneysel gözlemlerle doğrulanmış ilkelere dayanmaktadır. Bununla birlikte, bu modeller her zaman fiziksel doğruluğu sağlayamayabilir ve geri dönüşümlülük ile enerji korunumu gibi temel fizik yasalarını tam olarak karşılayamayabilir.

1975 yılında Bui Tuong Phong, speküler yansımaları simüle etmek için Phong yansıma modelini ortaya koymuştur (Phong, 1975). En eski BRDF modellerinden biri olarak kabul edilen bu model, yüzeydeki bir noktanın gözlemciye doğru yansıttığı ışığı, farklı ışık yoğunluklarının toplamı olarak tanımlamıştır. Phong yansıma modeli, yüzeylerin ışık yansımasını modellemek için kullanılan en temel ve yaygın yansıma dağılım fonksiyonlarından biridir. Basit ama etkili yapısı sayesinde yüzeylerin mat ya da parlak görünmesini modellemekte ve günümüzde hâlâ birçok bilgisayar grafik uygulamasında temel bir referans olarak kullanılmaktadır.

Phong modeli, bir yüzeydeki ışığın davranışını iki ana bileşenle açıklamaktadır. Dağınık ışık, yüzey üzerindeki yayılımı, speküler ışık ise ışığın gözlemciye doğru yansıyan bileşeni teslim etmektedir. Phong BRDF, bu iki bileşeni bir araya getirerek yüzeyin yansıma davranışını hesaplamaktadır. Ancak Phong modeli, daha karmaşık yüzey özelliklerini ve mikro detayları simüle etmekte yetersiz kalmaktadır.

1977 yılında Jim Blinn, Phong modelini geliştirerek Blinn-Phong yansıma modelini önermiştir (Blinn, 1977). Bu modeli, speküler yansımaların hesaplanmasında yapılan işlemleri basitleştirerek, daha verimli bir hesaplama süreci sunar. Phong modelinde speküler bileşen, ideal yansıma vektörü ile görüş vektörü arasındaki açıya bağlı hesaplanırken, Blinn-Phong modelinde bunun yerine yarım vektör (*half-vector*) kullanılır. Yarım vektör, ışık kaynağı vektörü ile görüş vektörünün ortasındaki yönü temsil etmektedir. Bu yaklaşım, özellikle hesaplama açısından daha verimlidir ve daha kararlı sonuçlar üretmektedir.

Blinn-Phong modeli, yüksek speküler üstel değere sahip yüzeylerde daha gerçekçi ayna yansımalar üretmektedir. Yansımalar, yüzeyin pürüzsüzlüğüne ve ışık kaynağının konumuna bağlı olarak daha odaklı ya da daha yayılmış şekilde gözlemlenir. Böylece, yüzeyler daha doğal görünür ve gerçekçilik artar. Ayrıca yarım vektör kullanımı, ışık kaynağı ve gözlemci arasındaki açı değişimlerinden kaynaklanan görsel hataları azaltır. Bununla birlikte, Blinn-Phong modeli de Phong modeli gibi gözlemcinin yüzeye göre yönünü dikkate almadığı için bazı durumlarda gerçekçi olmayan yansımalar üretebilir.

1992'de Ward, nesnelerin yansıma verilerini ölçerek ve uydurarak geliştirdiği deneysel bir model olan Ward BRDF modelini önermiştir (Ward, 1992). Bu model, özellikle fotogerçekçi görüntüleme ve ışık yansıtma özelliklerinin simülasyonu açısından önemli bir adım olmuştur. Ward modeli, metalik yüzeylerin yansıma özelliklerini daha doğru şekilde modellemeyi hedeflemiş, geleneksel Lambertian yüzey modellerinin yetersiz kaldığı durumlarda mikro pürüzlülük ve yüzey geometrisinin etkilerini dikkate alarak daha gerçekçi sonuçlar sağlamıştır. Özellikle farklı yönlerde farklı özellik gösteren anizotropik yüzeylerin yansıma davranışlarını tanımlamada önemli katkılar sunmuştur.

Ancak, orijinal Ward BRDF modeli, ışığın saçılması sırasında enerji kaybına sahiptir. Arne Dür, 2006 yılında Ward'ın modelini geliştirerek enerji korunumu açısından daha doğru ve esnek bir versiyon ortaya koymuştur. (Dür, 2006). Bunun sonucunda Ward-Dür modeli, yüzey yansımalarının enerji korunumu ilkelerine uygun olmasını sağlamıştır. Daha sonra 2010 yılında, Geisler-Moroder ve Dür, Ward-Dür modelini geliştirerek tüm açılarda enerjiyi koruyan bir versiyon sunmuştur (Geisler-Moroder & Dür, 2010). Bu model, sınırlı bir yansıma oranı parametresi kullanarak enerjinin korunmasını tüm açılarda sağlamaktadır.

Ward'ın 1992'de geliştirdiği model, bilgisayar grafikleri ve görselleştirme açısından devrim niteliğinde bir gelişme olarak kabul edilmektedir.

2000 yılında Ashikhmin ve Shirley; Ward, Schlick ve Neumann gibi araştırmacıların çalışmalarından esinlenerek yeni bir BRDF modeli önermiştir (Ashikhmin & Shirley, 2000; Neumann et al., 1999; Schlick, 1994). Ashikhmin-Shirley modeli, enerji korunumu ve karşılıklılık gibi birçok istenen özelliği sağlayan bir deneysel model olmuştur. Bu model, fırçalanmış metal yüzeylerde görülen çizgili efektler gibi anizotropik yansımaları doğru bir şekilde simüle etmektedir. Modelin parametreleri sezgiseldir ve Fresnel etkisini dikkate alarak geliş açısı küçüldükçe speküler yansımaların artmasını sağlamaktadır. Ek olarak, dağınık terim sabit değildir, bu nedenle geliş açısı azaldıkça dağınık bileşen azalmaktadır. Bu model Monte Carlo işleme teknikleri için oldukça uygundur.

2.5.2 Fiziksel Tabanlı Modeller

Sayısal modeller, yüzey yansımasını fiziksel ilkelere dayalı olarak ayrıntılı bir şekilde hesaplayan ve daha doğru sonuçlar üreten modellerdir. Fiziksel doğruluğa sahip olduklarından, gerçekçi görüntüleme ve simülasyonlarda tercih edilirler. Bu modeller, yüzeylerin mikro yapısını ve ışığın yansıma yönünü daha doğru bir şekilde tanımlar. Fiziksel tabanlı BRDF modelleri, enerji korunumu ve Helmholtz karşılıklılık ilkesi gibi fizik kavramları üzerine kuruludur.

1967'de Torrance ve Sparrow, çalışmalarında ışıma ve mikro-yüzey (*microfacet*) teorisini kullanarak pürüzlü yüzeyler için speküler yansıma modeli üretmişlerdir (Torrance & Sparrow, 1967). 1981'de Cook ve Torrance, bu modelin geliştirilmiş versiyonu olan Cook-Torrance modelini tanıtmışlardır (Cook & Torrance, 1982). Cook-Torrance modeli, mikro-yüzey teorisine dayanmaktadır. Bu teoriye göre,

yüzeyin düzensiz yapısı mikro düzeydeki eğimler ve çıkıntılardan oluşmakta ve ışık bu mikro yüzeylerle etkileşime girerek pürüzlülüğe bağlı olarak farklı açılarda yansımaktadır. Model, yüzeyin sadece yansıma özelliklerini değil, aynı zamanda pürüzlülük, gölgelenme ve ışık kırılma etkilerini de dikkate almaktadır.

Cook-Torrance modeli, bilgisayar grafiklerinde yaygın olarak kullanılan metal ve cam gibi malzemeleri simüle etmek için geliştirilmiştir. Buna ek olarak, ışığın teğet açılarında yansımasını yani Fresnel etkisini doğru bir şekilde modelleme yeteneğine sahiptir. Model, fırçalanmış metalin görünümü için anizotropik yansımaya da sağlayabilmekte ve donuk yüzeylerden parlak yüzeylere kadar çok çeşitli malzemeleri simüle etmekte kullanılmaktadır.

1991'de He ve ekibi, dalga optiğine dayalı daha karmaşık ve tamamen fiziksel bir BRDF modeli önermiştir (He et al., 1991). Bu model, ışığın küçük saçılma açılarının polarizasyonunu, kırınımını, girişimini, yüzey iletkenliğini ve pürüzlülüğünü dikkate alarak mikro-yüzey modellerinden daha fazla optik olayı simüle edebilmektedir. Ancak hesaplama maliyeti çok daha yüksektir.

Oren-Nayar modeli, Oren ve Nayar tarafından 1994 yılında pürüzlü yüzeyler için geliştirilmiş bir BRDF modelidir (Oren & Nayar, 1994). Lambert modelinin bir uzantısı olan bu model, yüzey pürüzlülüğünün ışığın yansıma biçimi üzerindeki etkilerini dikkate almaktadır. Oren-Nayar modelinin temel avantajı, gerçek nesnelerin yüzey pürüzlülüğünü belirli bir ölçüde simüle ederek nesneleri daha dokulu ve gerçekçi hale getirmesidir. Ancak, hesaplama maliyeti yüksek olduğundan, gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımı sınırlı kalmaktadır.

2.5.3 Veri Odaklı Modeller

Veri odaklı modeller, ölçüm verilerini kullanarak anizotropik BRDF'leri tanımlamak ve ölçmek için kullanılan genel bir yaklaşımdır. Bu modeller, çok sayıda BRDF malzemesini yüksek boyutlu vektörler biçiminde temsil ederek kaydeder ve ardından boyut indirgeme yöntemleri aracılığıyla bu verilerden daha düşük boyutlu modeller oluşturur. Böylece, arama tablosu tabanlı bir yaklaşımla işleme sonuçlarına doğrudan erişim sağlanır ve gerçek zamanlı hesaplama maliyetleri önemli ölçüde azaltılır.

Matusik ve ekibi, 2003 tarihli çalışmalarında, veri odaklı bir yansıma modelinin nasıl elde edilebileceğini ortaya koymuştur (Matusik et al., 2003). Ayrıca, birçok

araştırma laboratuvarı, farklı ışık ve gözlem açıları altında çeşitli gerçek dünya yansıma verilerini ölçmek için özel cihazlar kullanmış ve bu verileri MERL BRDF veri tabanı gibi kamuya açık veri tabanlarında paylaşmıştır.

Veri odaklı modeller, gerçek dünya malzemelerinin ölçümlerine dayandığından, ortaya çıkan sonuçlar yüksek derecede gerçekliğe sahiptir. Ancak, bu modellerin önemli bir dezavantajı, efektlerin ayarlanmasına olanak tanıyan parametrelerin eksikliği nedeniyle istenilen sonuçların doğrudan veri üzerinden değiştirilememesidir. Ayrıca, enstrüman kısıtlamaları nedeniyle bazı aşırı açılar için veri toplama süreci zorluklar içermektedir. Bu modeller büyük miktarda veri gerektirdiği gibi, hesaplama açısından da maliyetlidir. Bu durum, gerçek zamanlı uygulamalar, özellikle video oyunları için veri odaklı modellerin kullanımını sınırlamaktadır. Öte yandan, filmler gibi çevrimdışı süreçlerde veri odaklı modeller etkili ve uygun bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, bu modeller, diğer BRDF modellerinin gerçekçilik düzeyini değerlendirmek amacıyla grafik araştırmalarında önemli bir referans noktası olarak kullanılmaktadır.

2.5.4 BRDF Tabanlı Aydınlatma Modellerin Karşılaştırılması

Deneysel BRDF modelleri (Phong, Blinn-Phong, Ward, Ashikhmin-Shirley), hesaplama açısından hızlı ve sezgisel parametreler sunmaları nedeniyle bilgisayar grafiklerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, fiziksel doğruluk açısından sınırlıdır ve özellikle enerji korunumu ya da mikro detayların simülasyonu gibi konularda yetersiz kalabilmektedir.

Fiziksel tabanlı modeller (Cook-Torrance, Oren-Nayar, He ve diğerleri), yüzeylerle ışık etkileşimlerini temel fizik prensiplerine uygun bir şekilde temsil etmektedir. Enerji korunumu, Fresnel etkisi ve mikro yüzey pürüzlülüğü gibi unsurları hesaplamalara entegre ederek daha yüksek gerçekçilik sağlamaktadır. Ancak, yüksek hesaplama maliyetleri nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımını sınırlı sınırlamaktadır.

Veri odaklı modeller (Matusik, MERL veri tabanı vb.) ise doğrudan ölçüm verilerine dayanarak en yüksek derecede gerçekçi sonuçları elde etmeye olanak tanır. Özellikle anizotropik yüzeylerin modellenmesinde öne çıkmaktadırlar. Ancak, büyük veri gereksinimleri, sınırlı parametre esnekliği ve yüksek hesaplama

maliyetleri nedeniyle genellikle film endüstrisi gibi çevrimdışı süreçlerde tercih edilmektedirler.

2.6 Katılımcı Medya Tabanlı Aydınlatma Modeli

Katılımcı medya tabanlı aydınlatma modelleri, ışığın yalnızca yüzeylerle değil, aynı zamanda bir ortam içindeki parçacıklarla etkileşimini simüle eden yöntemlerdir. Bu ortamlar; hava, sis, duman, su gibi şeffaf veya yarı şeffaf maddeleri içerebilir. Katılımcı ortam modelleri, ışığın emilimi, saçılımı ve yeniden yönlendirilmesini dikkate alarak sahnelerde daha gerçekçi ve etkileyici görsel sonuçlar elde edilmesini sağlar (Cerezo et al., 2005).

Katılımcı ortamlar, içinden geçen ışığın emilimi ve saçılımıyla etkilendiği, parçacıklarla dolu hacimlerdir. Bu terim, ışık iletimine aktif olarak katılan ortamları tanımlamaktadır. Bilgisayar grafiklerinde, genellikle katı yüzeylerin yanı sıra su, sis, buhar ve hava gibi düşük yoğunluklu ortamların da ışıkla etkileşimlerinin modellenmesi büyük önem taşır. Ortamın bileşimi ve parçacık yoğunluğu, ışığın ortam içindeki davranışını belirler. Homojen ortamlarda (örneğin, hava ya da su) yoğunluk sabitken, heterojen ortamlarda (örneğin, bulutlar veya buhar) yoğunluk değişkendir. Deri veya mum gibi bazı yoğun malzemeler, yüksek seviyede ışık saçılımı gösterir ve bu tür etkileşimler dağınık yüzey gölgeleme modellerinin temelini oluşturur. Sonuç olarak, tüm ortamlar, yoğunlukları ve bileşimlerine bağlı olarak ışığı belirli oranlarda emer ya da saçar (Deng et al., 2020).

Son yıllarda, katılımcı medyanın işlenmesine yönelik olarak çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında sanal ışın ışıkları (*VRL – Virtual Ray Light*) (Novák et al., 2012), birleşik noktalar, ışınlar ve yollar yaklaşımı (*UPBP – Unifying Points Beams and Paths*) (Křivánek et al., 2014), foton haritalama yöntemine yönelik çeşitli uzantılar, Monte Carlo tabanlı algoritmalar (Herholz et al., 2019) ve nokta tabanlı yöntemler (B. Wang & Holzschuch, 2018) yer almaktadır. Bu tekniklerin tümü, katılımcı medya simülasyonunun doğruluğunu ve görsel kalitesini önemli ölçüde artırmıştır.

- **Katılımcı Medya Özellikleri**

Bir katılımcı ortamda, bir ışının taşınan ışıma miktarı üç temel faktörden belirlenir (Howell et al., 2020).

Emilme: Emilme, ortamın ışığın bir kısmını absorbe ederek enerjiyi ısı ya da başka enerji türlerine dönüştürme sürecidir. Emilen ışık miktarı, ortamın opaklık derecesini doğrudan etkiler.

Saçılma: Saçılma, ışığın ortam içerisindeki parçacıklara çarpmasıyla yön değiştirmesiyle gerçekleşir. Bu süreçte, ışık farklı yönlere dağılır. Tekil saçılmada ışık sadece bir kez saçılarak gözlemciye ya da başka bir yüzeye ulaşırken, çoklu saçılmada ışık birçok kez saçılarak farklı yönlere yayılır. Bu durum yoğun ortamlarda daha belirgindir.

Işık Yayılımı: Yayılım, ışık hem emilme hem de saçılma süreçlerinin bir sonucu olarak ışığın yoğunluğunun azalmasını ifade eder.

Tablo 2.3 Katılımcı medyada kullanılan kavramlar ve birimler (Akenine-Möller et al., 2018)

Sembol	Tanımlama	Birim
$\boldsymbol{\sigma_a}$	Emilim katsayısı	m^{-1}
$\boldsymbol{\sigma_s}$	Saçılım katsayısı	m^{-1}
$\boldsymbol{\sigma_t}$	İletim katsayısı	m^{-1}
$\boldsymbol{\rho}$	Yansıma oranı (albedo)	Birimsiz
$\boldsymbol{p}$	Faz fonksiyonu	sr^{-1}

Katılımcı medya tabanlı aydınlatma modelleri, genellikle ışık taşıma denklemi (*RTE – Radiative Transfer Equation*) üzerine kuruludur. Bu denklem, bir ortam içinde ışığın emilme, saçılma ve yayılma süreçlerini matematiksel olarak tanımlar (Tablo 2.3) (Denklem 2.11):

$$L(x,\omega) = L_e(x,\omega) + \int_V \sigma_s(x,\omega') \cdot L(x,\omega') \cdot p(\omega',\omega) d\omega' \qquad (2.11)$$

Bu denklemde:

$L(x,\omega)$ x konumundaki ω yönündeki ışık yoğunluğunu,

$L_e(x,\omega)$ ışık kaynağından yayılan ışığı (emisyon),

$\sigma_s(x,\omega')$ saçılma katsayısını

$p(\omega',\omega)$ faz fonksiyonunu; ışığın hangi yöne saçıldığını belirler.

2.6.1 Katılımcı Medya Tabanlı Aydınlatma Model Türleri

Katılımcı medya tabanlı modeller, ışığın bir ortam içindeki davranışını simüle eden yöntemlerdir. Bu modeller, sahnelerdeki gerçekçiliği artırmak amacıyla farklı türlerde sınıflandırılmaktadır.

- **Hacimsel Aydınlatma (*Volumetric Lighting*)**

Bilgisayar grafikleri ve görselleştirme alanında, ışığın bir ortam boyunca yayıldığını, emildiğini ve saçıldığını simüle eden bir aydınlatma yöntemidir. Katı yüzeyler yerine, duman, sis, buhar ya da su gibi katılımcı ortamlarla ışığın etkileşimlerini modellemek için kullanılmaktadır. Bu teknik, sahnelere derinlik, atmosfer ve dramatik bir görsel etki kazandırması açısından özellikle önemlidir (Novák et al., 2018).

- **Işın Yürüyüşü (*Ray Marching*)**

Işın izleme yöntemine benzer bir prensipte çalışan, ışın yürüyüşü, ışığın ilerlediği her adımda ortamın yoğunluğunu ya da yüzeyle olan mesafesini hesaplamaktadır. Bu özellik, karmaşık hacimsel ortamların simülasyonunda önemli bir avantaj sağlamaktadır.

- **Tekil Saçılma (*Single Scattering*)**

Tekil saçılma modeli, ışığın yalnızca bir kez saçıldığı durumları simüle etmektedir. Bu yöntem, yoğunluğu düşük ortamlarda (örneğin hafif sis) daha basit hesaplamalarla hızlı sonuçlar vermektedir. Ancak çoklu saçılmanın etkili olduğu

yoğun ortamlarda gerçekçilik düzeyi sınırlıdır. (Jönsson et al., 2014; Yan et al., 2012).

- **Çoklu Saçılma *(Multiple Scattering, SSS*)**

Çoklu saçılma modeli, ışığın birden fazla kez saçıldığında ortaya çıkan karmaşık etkileşimleri simüle etmektedir. Yoğun sis, duman ya da su gibi ortamlarda daha gerçekçi sonuçlar üretebilir. Hesaplama maliyeti yüksektir, ancak sonuçlar son derece detaylıdır (Jönsson et al., 2014; Yan et al., 2012).

- **Alt Yüzey Dağılımı (*Subsurface Scattering*)**

Alt yüzey dağılımı, ışığın yarı şeffaf maddelere (cilt, mum, süt gibi) nüfuz ederek iç kısımlarında yayılması ve ardından yüzeyden tekrar çıkmasını simüle eden bir yöntemdir. Bu model, özellikle cilt gibi organik malzemelerin gerçeğe yakın görselleştirilmesinde kritik rol oynamaktadır (Dutré et al., 2006; Kurachi & Stark, 2011). Bu teknik, gerçekçi insan modeli oluşturma ve film endüstrisinde ileri düzey görsel efektler için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ek olarak, katılımcı medya modelleri daha ayrıntılı olarak anizotropik saçılma, homojen/heterojen ortam ayrımı, farklı faz fonksiyonları ve termal ışık emisyonu gibi alt kategorilere ayrılabilir. Bu sınıflamalar, özellikle karmaşık veya optik olarak yoğun ortamların simülasyonunda doğruluk ve gerçekçilik düzeyini artırmak için önem taşımaktadır.

2.7 BRDF ile Katılımcı Medya Tabanlı Aydınlatma Modellerinin Karşılaştırılması

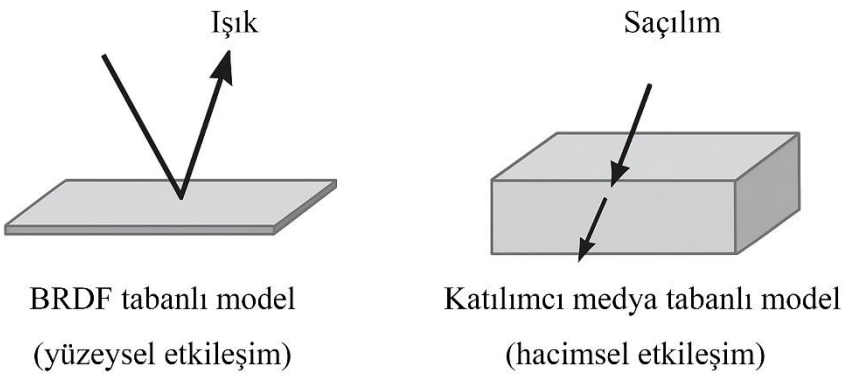
BRDF tabanlı modeller ve katılımcı medya tabanlı modeller, ışığın farklı fiziksel ortamlarla etkileşimini temsil eden iki temel yaklaşımdır. BRDF (Çift Yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu) tabanlı yöntemler, ışığın yüzeylerle olan etkileşimlerini ele alırken, katılımcı medya tabanlı yöntemler, ışığın bir hacim (katılımcı ortam) içerisinde emilim, saçılım ve yayılımını simüle eder (Tablo 2.4).

BRDF, bir yüzeyin ışık yansıma özelliklerini tanımlayan matematiksel bir fonksiyondur. Gelen ve giden ışık açılarına bağlı olarak, bir yüzeyden yansıyan ışığın miktarını hesaplar. Bu modeller, genellikle opak yüzeylerin görselleştirilmesinde ve basit aydınlatma durumları için kullanılır. BRDF tabanlı

modellerin en önemli avantajı, hesaplama açısından oldukça hızlı olmalarıdır. Bu nedenle gerçek zamanlı işleme motorlarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu yöntem yalnızca yüzey etkilerine odaklıdır ve hacimsel etkileşimleri dikkate almamaktadır.

Katılımcı medya tabanlı aydınlatma modelleri ise, ışığın bir ortamda içerisindeki emilim, saçılım ve yayılımını dikkate alarak daha karmaşık fiziksel etkileşimleri simüle eder. Bu yöntemler, sis, duman ya da su gibi hacimsel etkilerin görselleştirilmesinde idealdir. Fiziksel doğruluğa odaklanan bu modeller, yüksek hesaplama maliyeti nedeniyle çevrimdışı işleme uygulamalarında tercih edilmektedir.

BRDF modelleri yalnızca yüzey odaklı etkileşimleri hesaplarken, katılımcı medya modelleri hacim içerisinde gerçekleşen emilim ve saçılma süreçlerini de dikkate almaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 BRDF ve katılımcı medya tabanlı modeller

Sonuç olarak, BRDF tabanlı modeller ve katılımcı medya tabanlı modeller, ışığın farklı fiziksel ortamlarla etkileşimini tanımlayan iki temel yaklaşımdır. BRDF yöntemleri, özellikle opak yüzeylerde ışığın yansımasını matematiksel olarak modelleyerek hızlı ve verimli çözümler sunar. Katılımcı medya tabanlı modeller ise, hacimsel ortamlarda ışığın emilim, saçılma ve yayılımını dikkate alarak yüksek

fiziksel doğruluk ve görsel gerçekçilik sağlar. Her iki yaklaşımın temel özellikleri ve kullanım alanları Tablo 2.4'te özetlenmiştir.

Tablo 2.4 BRDF ile katılımcı medya tabanlı modellerin karşılaştırılması

Kriter	**BRDF Tabanlı Modeller**	**Katılımcı Medya Tabanlı Modeller**
Temel tanım	Yüzeylerde ışığın yansımasını modelleyen fonksiyonlar	Hacimsel ortamlarda ışığın emilim, saçılım ve yayılımını simüle eder
Etkileşim türü	Yansıma, kırılma	Emilme, saçılma, çoklu saçılma
Işık etkileşimi	Sadece yüzey etkileşimi	Yüzey ve hacim etkileşimi
Fiziksel kuramlar	Fresnel yansıma, mikro yüzey dağılımı, enerjinin korunumu	Işık taşıma denklemi
Fiziksel doğruluk	Yüzey odaklı, sınırlı fiziksel doğruluk	Hacimsel ışık taşınımında yüksek fiziksel doğruluk
Hesaplama maliyeti	Düşük, gerçek zamanlı uygulamalar için uygun	Yüksek, offline işlemeler için uygun
Kullanım alanları	Oyun motorları, gerçek zamanlı görselleştirme	Film endüstrisi, bilimsel simülasyonlar, ileri düzey işleme
Gerçek zamanlı uygunluk	Oldukça uygun	Sınırlı uygunluk ya da uygun olmama

BRDF tabanlı modeller, hesaplama verimliliği ve gerçek zamanlı uygulamalardaki uygunluğu ile öne çıkarken; katılımcı medya tabanlı modeller, hacimsel ışık taşınımının fiziksel doğruluğunu sağlayarak film ve bilimsel simülasyon gibi yüksek kaliteli uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu nedenle, özellikle sıvı ve duman gibi hacimsel ortamların görselleştirilmesinde her iki yaklaşımın birlikte kullanımı gerekebilir.

Gerçekçi görselleştirme ve simülasyonlarda, BRDF tabanlı modeller ile katılımcı medya tabanlı modellerin hibrit kullanımı giderek önem kazanmaktadır. BRDF modelleri, yüzey yansımalarını hızlı ve etkili bir şekilde hesaplayarak gerçek zamanlı uygulamalarda performans sağlar. Katılımcı medya modelleri ise hacimsel ışık etkileşimlerini yüksek doğrulukla simüle ederek sahnelere atmosferik ve fiziksel derinlik kazandırır. Bu iki yaklaşımın bir arada kullanılması, özellikle sıvı, sis, duman ve yarı şeffaf malzemelerin yer aldığı karmaşık sahnelerde hem performans hem de görsel gerçekçiliğin optimize edilmesine olanak tanır. Hibrit yöntemler, hesaplama verimliliğini korurken, fiziksel doğruluğu da artırmak için ideal bir çözüm sunmaktadır.

3
CORNELL KUTUSU VE SANAL SAHNE DENEYLERİ

Bu çalışmada, sıvıların emilim ve saçılım özelliklerinin küresel aydınlatmaya olan etkilerini incelemek amacıyla bir deney tasarlanmıştır. Deney kapsamında, kenar uzunluğu 55 cm olan küp biçiminde bir Cornell kutusunun içine, farklı sıvılarla doldurulmuş bir kadeh yerleştirilmiştir. Her bir sıvı için, Cornell kutusunun yüzeylerinde oluşan ışıklılık değerleri ölçülmüş ve bu ölçümlerden bir veri seti oluşturulmuştur. Aynı sahne, dijital görüntü sentezi yapabilen V-Ray 6 ve Corona yazılımları kullanılarak sanal ortamda yeniden oluşturulmuştur. Çalışmanın sonunda, gerçek maketten elde edilen yüzey ışıklılık değerleriyle sanal ortamdan elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

Cornell kutusu deneyi, gerçek dünyayı temsil ederken, sanal sahne deneyi bu gerçekliğin fiziksel tabanlı simülasyonu olarak kurgulanmıştır. Bu bağlamda, Cornell kutusundaki yüzeylerin ışıklılık değerlerinin değişimine neden olan fiziksel faktörler, sanal sahne deneyinin temelini oluşturmuştur. Çalışmanın amacı, simülasyonun yüksek doğrulukta gerçekleştirilmesi için bir algoritma modeli geliştirmektir.

3.1 Cornell Kutusu Deneyi

Cornell Box deneyi; gerçek dünyadaki ışık ve gölge etkileşimlerini simüle etmek ve analiz etmek için tasarlanmış bir deneydir. 1980'lerin ortalarında Cornell Üniversitesinde geliştirilmiş bu deneyde, kutu yüzeylerinde kırmızı ve yeşil renklerin seçilmesinin birkaç nedeni bulunmaktadır:

Renk Kontrastı: Kırmızı ve yeşil, renk spektrumunda birbirine zıt olduklarından, ışığın farklı yüzeylerde yansıma ve yayılım davranışını gözlemlemeyi kolaylaştırır.

Bu zıtlık ışığın farklı renkler üzerinde davranışını daha net bir şekilde analiz etmeyi sağlar.

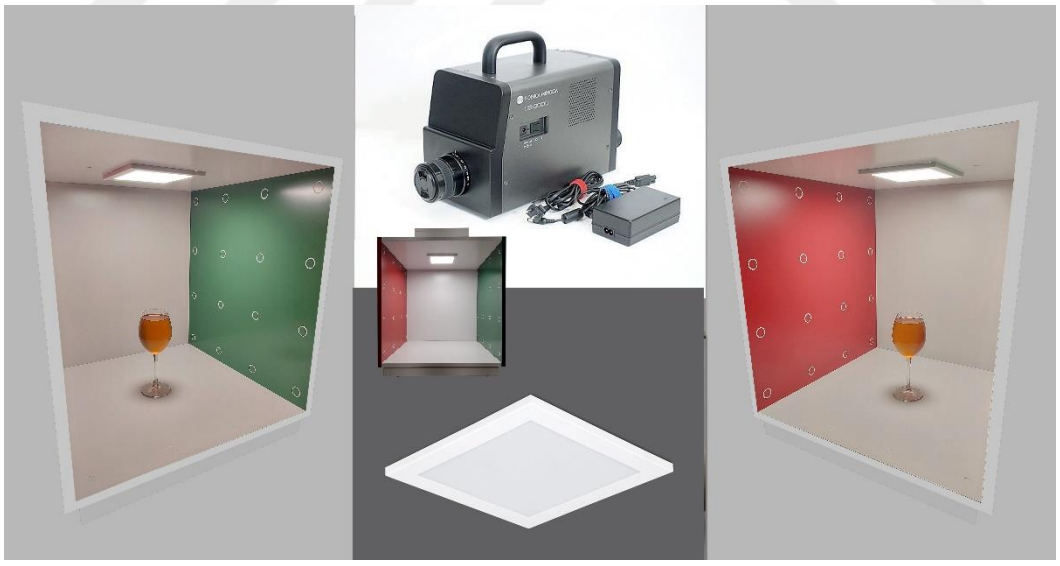
Işık yansıması ve yayılması: Kırmızı ve yeşil gibi güçlü renkler, ışığın yüzeyler üzerindeki yansıma ve yayılma özelliklerini belirgin hale getirir. Bu sayede, ışığın optik etkileşimleri daha detaylı incelenebilir.

Gerçekçilik ve doğruluk: Bu renklerin kullanılması, bilgisayar grafiklerinde ve görsel efektlerde gerçekçi sahneler oluşturmak için yapılan hesaplamaların doğruluğunu test etmeye olanak sağlar. Böylece ışık ve gölge etkileşimleri ile bu etkileşimlerin insan gözü tarafından algılanışı daha güvenilir bir şekilde değerlendirilebilir.

Psikolojik etki: Kırmızı ve yeşil renkler, insan gözü tarafından kolayca ayırt edilebildiğinden, gözlemcilerin ışık ve renk etkileşimlerini daha rahat analiz etmesini sağlamaktadır.

3.1.1 Deney Bileşenleri

Deney, aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır; her bir bileşen, deneyin uygulanabilirliği ve ölçümlerin güvenilirliği açısından önemlidir (Şekil 3.1).

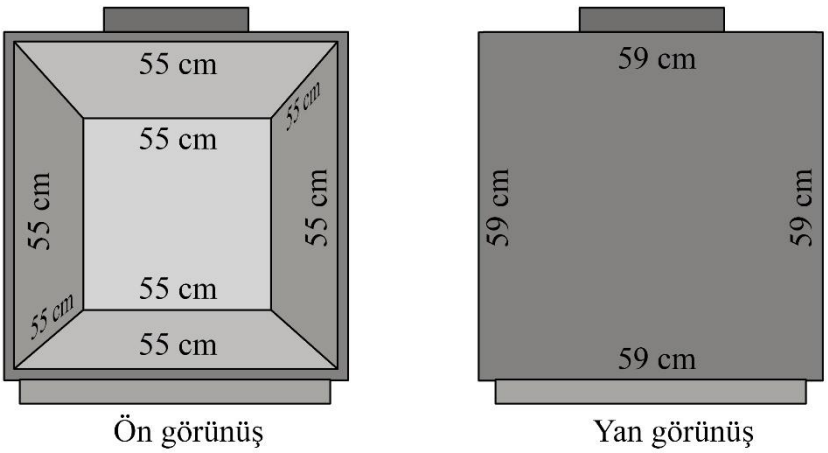


Şekil 3.1 Deney kutusu, armatür, spektroradyometre ve sıvılar

- Cornell kutusu
- Deney ortamı / ölçüm mekânı
- Sıva üstü aydınlatma armatürü
- Ölçüm cihazı

- **Cornell kutusu**

Bu çalışmada kullanılan Cornell kutusu, ışığın farklı yüzeylerdeki yansıma ve saçılma özelliklerini analiz etmek için tasarlanmış küp biçiminde bir deney ortamıdır. Kenar uzunluğu 55 cm olan küp biçimindedir (Şekil 3.2). İç yüzeyleri, RAL renk kodlarına uygun olarak boyanmıştır. Cornell kutusu, ışığın yansıma, saçılma ve renk etkileşimlerini gözlemlemek için deneyin temel mekanını oluşturmaktadır. Aydınlatma armatürü, tavan yüzeyinin geometrik merkezine yerleştirilmiştir. Kutunun boyutları, kullanılan armatürün teknik özelliklerine uygun şekilde belirlenmiş olup, böylece yüzeylerde aşırı ışıklılık oluşması önlenmiştir. Renkler, orijinal Cornell kutusuna olabildiğince yakın olacak şekilde seçilmiştir. Ayrıca, yüzeylerin renkleri sanal sahne deneyinde doğru simüle edilebilmesi amacıyla, RAL renk kodları ile belirlenmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.2 Cornell kutusunun ölçüleri



Şekil 3.3 Deney kutusu ve RAL kodları

Kenar uzunluğu 55 cm olan küp biçiminde bir Cornell kutusunun iç yüzeyleri RAL kodu tanımlı renkler ile boyanmıştır. Deney kutusu yüzeylerindeki üç rengin diğer tüm renk sistemlerindeki eşdeğerleri hesaplanmıştır (Tablo 3.1). Bu değerler daha sonra yapılacak sanal deneyde referans olacaktır. Eşdeğerler, RGB.to web sitesi referans alınarak belirlenmiştir (https://www.rgb.to/).

Tablo 3.1 RAL renk kodlarının diğer renk sistemlerindeki eşdeğerleri

RAL 6001 (Yeşil)			
RGB	54, 103, 53	CSS	rgb(54, 103, 53);
HSL	119, 32, 31	CSS	hsl(119, 32%, 31%);
HSB	119, 49, 40	Hex	#366735
CMYK	80, 30, 100, 10	Websafe	#336633
RAL 3020 (Kırmızı)			
RGB	187, 30, 16	CSS	rgb(187, 30, 16);
HSL	5, 84, 40	CSS	hsl(5, 84%, 40%);
HSB	5, 91, 73	Hex	#bb1e10
CMYK	0, 100, 100, 10	Websafe	#cc3300
RAL 9003 (Beyaz)			
RGB	236, 236, 231	CSS	rgb(236, 236, 231);
HSL	60, 12, 92	CSS	hsl(60, 12%, 92%);
HSB	60, 2, 93	Hex	#ecece7
CMYK	0, 0, 0, 0	Websafe	#ffffff

- **Deney ortamı / Ölçüm mekânı**

Ölçümler, üniversitede bulunan çekim platosunda gerçekleştirilmiştir. Platonun bodrum katta yer alması nedeniyle, mekânda herhangi bir pencere veya ışık girişi bulunmamaktadır. Ölçüm yapılan bölümde, dış ışığın etkisini tamamen engellemek amacıyla siyah perde kullanılmıştır. Deney sırasında tüm katın elektrik sistemi kapatılmış ve dış ışık etkilerinin tamamen ortadan kaldırılması için ölçümler gece 21:00–24:00 saatleri arasında yapılmıştır. Ölçüm yapılan mekânın boyutları 10 m×14 m, kat yüksekliği ise 12 m'dir. Cornell kutusu ve ölçüm cihazının mekân içindeki konumları, Şekil 3.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Deney ortamı

- **Sıva üstü aydınlatma armatürü**

Aydınlatma armatürü, kutunun tavanının geometrik merkezine yerleştirilmiştir. Kutunun boyutları, kullanılan armatürün teknik özelliklerine göz önünde bulundurularak belirlenmiş ve yüzeylerde aşırı ışıklılık oluşması önlenmiştir. Bu tercih, deneysel ortamın dengeli aydınlatılmasına ve ölçümlerin güvenilir şekilde yapılmasına katkı sağlamıştır. Renkler ise orijinal Cornell kutusuna olabildiğince yakın tutulmuş, deneysel tasarımın uluslararası literatürle uyumlu olması gözetilmiştir.

Deneyde kullanılan armatür, iç mekân aydınlatmasında kullanılan, sıva üstü bir modeldir (Tablo 3.2; Tablo 3.3). İkizler Aydınlatma firması tarafından temin edilmiş ve ardından şirketin laboratuvarında tekrar test edilmiştir. Endüstriyel

üretimde kullanılan armatürlerin teknik verileri birbirine yakın olmakla birlikte, üretim koşullarından bağlı olarak ölçülebilir sapmalar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, deneyde kullanılan armatürün tüm teknik özellikleri yeniden ölçülmüş ve böylece sanal sahnede gerçekleştirilecek simülasyonun gerçeğe en yakın biçimde oluşturulması için gerekli veriler güncellenmiştir.

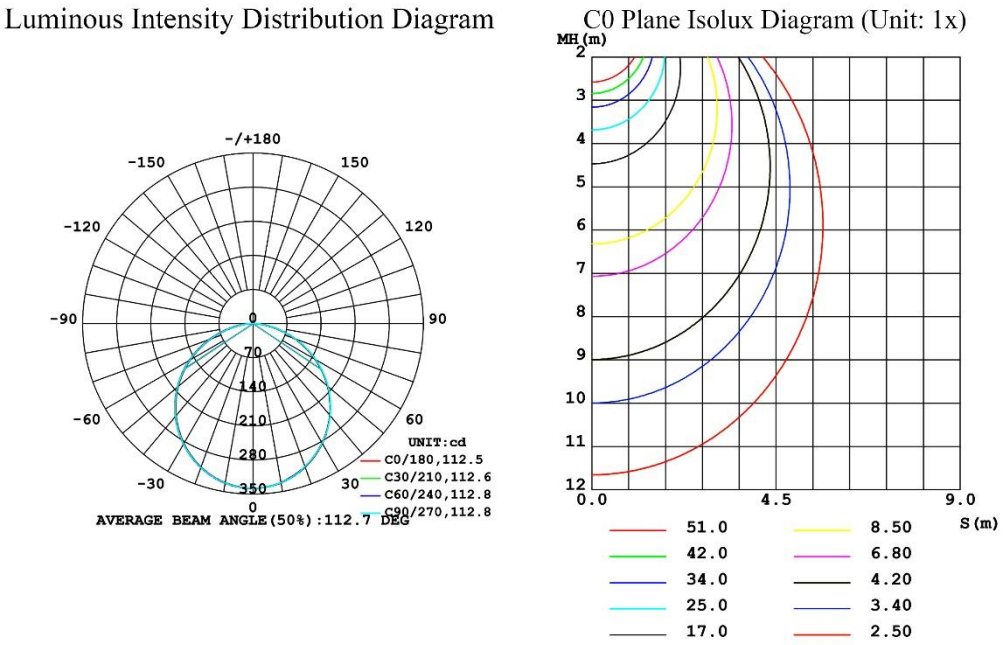
Tablo 3.2 Armatürün teknik özellikleri

Armatür fotometrik test raporu			
İsim	Canvas-T	**Tip**	Sıva üstü
Model	Led	**Ölçü**	175x175x115mm
Özellik	4000K	**Ağırlık**	0,6 kg
Nominal akı (lm)	983,472	**Test voltaj (V)**	220
Nominal güç (W)	18,67	**Yüklü voltaj (V)**	220

Tablo 3.3 Armatürün fotometrik verileri

Armatür fotometrik veriler Eff: 52,66 lm/W			
Imax (cd)	338,1	**S/MH (C0 / 180)**	**1,25**
LOR (%)	100,0	**S/MH (C90 / 270)**	**1,26**
Toplam akı (lm)	983,47	**η UP, DN (C0 - 180)**	**0,9 – 49,2**
CIE Class	Direct	**η UP, DN (C180 - 360)**	**0,6 – 49,2**
η up (%)	1,6	**CIBSE SHR NOM**	**1,25**
η down (%)	98,4	**CIBSE SHR MAX**	**1,35**

Ayrıca, ışık dağılım karakteristiğinin sanal ortamda doğru şekilde temsil edilmesi amacıyla armatürün ışık dağılım haritası **(***IES – Illuminating Engineering Society***)** hazırlanmıştır (Şekil 3.5). Bu harita, 3D modelleme sürecinde ışığın yönelimi, yoğunluğu ve yayılımının fiziksel gerçekliğe uygun olarak aktarılmasını sağlamış ve deneyin güvenilirliğini artırmıştır.



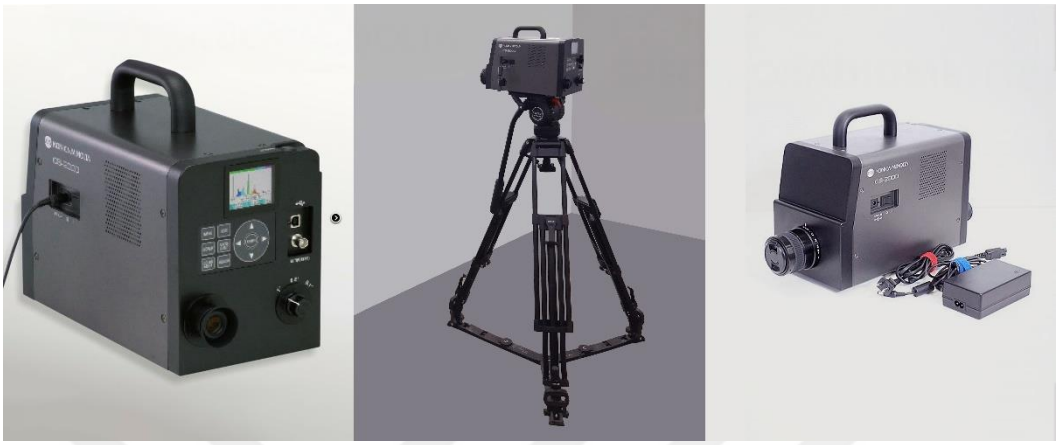
Şekil 3.5 Armatürün ışık dağılım haritası

- **Ölçüm cihazı**

Ölçümlerde, yüksek hassasiyetli bir cihaz olan Konica Minolta CS-2000 Spektroradyometre kullanılmıştır (Şekil 3.6). Bu cihaz, 380 nm ile 780 nm arasındaki görünür dalga boyu aralığında spektral dağılımı ölçme kapasitesine sahiptir. Ölçüm doğruluğu ve 1 nm gibi dar bant genişliğinde yüksek çözünürlüğü sayesinde hem renk ölçümlerinde hem de ışıklılık değerlerinin analizinde güvenilir sonuçlar sunmaktadır.

CS-2000, özellikle düşük parlaklık seviyelerinde dahi yüksek hassasiyet sağlayabilmesiyle öne çıkmaktadır. Bu özellik, deneyin gerçekleştirildiği düşük aydınlatmalı ortam koşullarında kritik bir avantaj sağlamıştır. Ayrıca cihazın ±2%'lik doğruluk toleransı, elde edilen verilerin sanal deneylerde kullanılabilecek güvenilirlik düzeyine ulaşmasına katkıda bulunmuştur.

Cihazın taşınabilir tasarımı, deney ortamına kolayca entegre edilmesine imkân tanımış, yazılım desteği ise ölçümlerin eş zamanlı olarak kaydedilmesini ve analiz edilmesini mümkün kılmıştır. Bu nedenlerle, Konica Minolta CS-2000, Cornell kutusu deneyinde kullanılacak en uygun ölçüm aracı olarak seçilmiştir.



Şekil 3.6 Konica Minolta CS-2000 Spektroradyometre cihazı

3.1.2 Deney Yöntemi

Cornell Kutusu içinde, bir boş kadeh ve 8 farklı sıvının, kutu yüzeyleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı sıvılardaki değer değişimleri tablolarla karşılaştırılmıştır. Bu deneyde; boş kadeh, su, süt, zeytinyağı, beyaz şarap, kırmızı şarap, bira, bal ve üzüm sirkesi kullanılmıştır (Şekil 3.7). Ölçümlerde elde edilen değerler ışıklılık birimi olan cd/m² cinsinden kaydedilmiş ve tablolar aracılığıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.7 Boş kadeh ve 8 farklı sıvının Cornell kutusu yüzeylerindeki ışıklılık değer değişimi

Tablo 3.4 Cornell kutusu içindeki ölçüm noktaları

Yüzey ölçüm noktaları	
Kırmızı yüzey	L01, L02, L03, L04, L05, L06, L07, L08, L09, L10, L11, L12, L13, L14, L15, L16
Yeşil yüzey	L17, L18, L19, L20, L21, L22, L23, L24, L25, L26, L27, L28, L29, L30, L31, L32
Beyaz yüzey	L33, L34, L35, L36, L37, L38, L39, L40, L41, L42, L43, L44, L45, L46, L47, L48



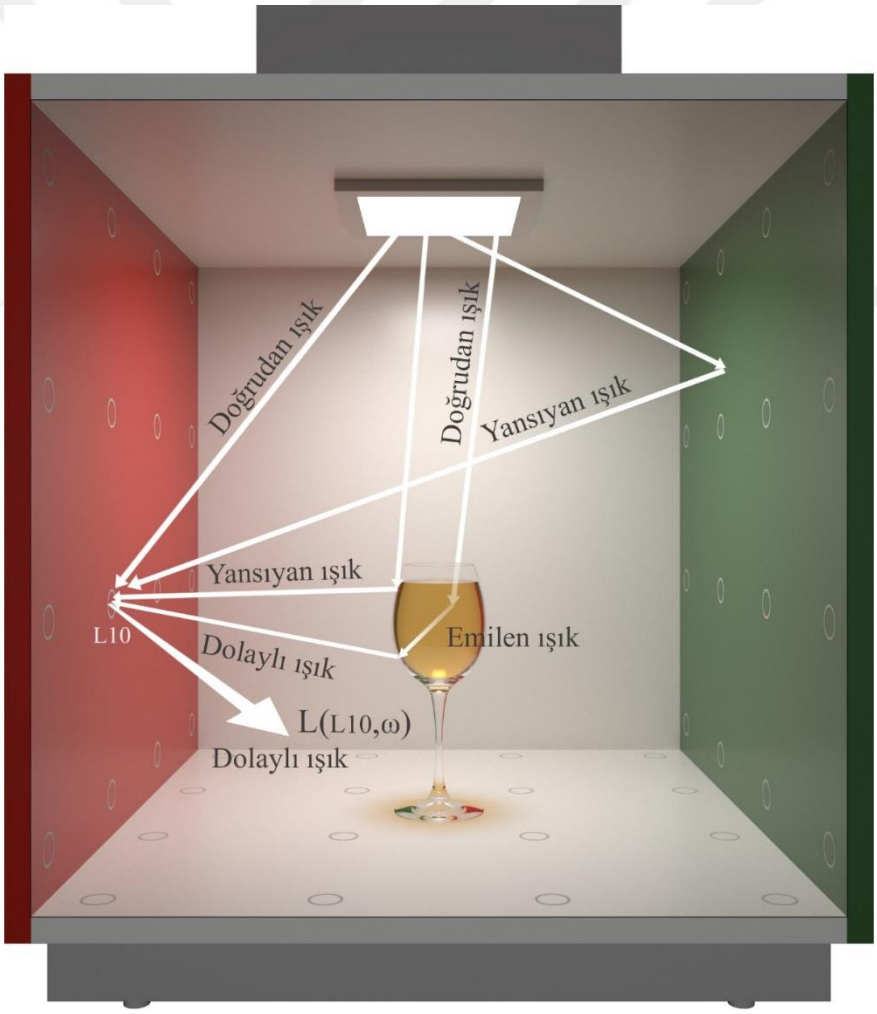
Şekil 3.8 Deney kutusu ve ölçüm noktaları

Her sıvı için Cornell kutusu yüzeyi üzerinde 16 farklı ölçüm noktası belirlenmiş ve ölçümler bu noktalardan alınmıştır (Tablo 3.4; Şekil 3.8). Böylece, farklı sıvıların yüzey ışıklılığı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Her ölçüm noktası

için kaydedilen ışıklılık değeri; doğrudan ışık, yüzeylerden yansıyan ışık ve sıvı içerisinde emilip saçıldıktan sonra gözlenen dolaylı ışığın toplamından oluşmaktadır.

Cornell kutusunda yüzeylerdeki ışıklılık değerlerini etkileyen başlıca fiziksel faktörler (Şekil 3.9);

- Armatürden doğrudan gelen ışık,
- Yüzeylerden yansıyarak ulaşan dolaylı ışık,
- Armatürden gelip kadeh yüzeyinden yansıyarak ulaşan dolaylı ışık,
- Armatürden gelip kadehteki sıvı içinde emilip ve saçıldıktan sonra yüzeylere ulaşan dolaylı ışık,



Şekil 3.9 Örnek olarak verilen L10 noktasındaki ışık şeması

Cornell kutusundaki üç farklı yüzey ölçüm kapsamına alınmıştır. Her yüzey, kenarlarından 2 cm boşluk bırakılarak yatay ve dikey olarak üç eşit parçaya bölünmüş, bu sayede 4 eksen elde edilmiştir. Eksenlerin kesişim noktaları ölçüm noktaları olarak belirlenmiş ve toplam 16 nokta üzerinden ölçüm yapılmıştır.

Cornell kutusunun bakış doğrultusundaki arka yüzeyinde ölçüm yapılmamıştır. Bunun nedeni, arka yüzeye gölge düşmesi ve ölçüm noktalarının kadeh tarafından perdelenmesidir. Bu durum deneysel tasarımın sınırlılıkları arasında değerlendirilmiş, ancak ölçümlerin güvenilirliğini etkilemeyecek şekilde kontrol altına alınmıştır. Dolayısıyla elde edilen veriler, yalnızca doğrudan ışığın ve sıvı kaynaklı dolaylı ışık etkilerinin gözlemlenebildiği yüzeyleri temsil etmektedir.

Kutunun üst yüzeyinin ortasında bulunan armatür, her yöne yaklaşık 180° açıyla ışık yaymaktadır. Bu nedenle, ölçüm noktalarının her biri ışık kaynağına göre farklı konum ve açılarda yer almakta, bu da ışığın dağılımı ve yansımasının daha ayrıntılı şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır.

Ölçümlerde kullanılan spektroradyometre, Cornell kutusunun yatay ve düşey orta aksına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Cihazın objektifi ile kutunun objektife bakan ön sınırı arasında 25 cm mesafe bırakılmıştır. Bu mesafe, hem kutunun tamamının görüş alanına girmesi hem de ölçüm doğruluğunun korunması açısından uygun görülmüştür. Ölçüm süreci boyunca cihazın konumu değiştirilmemiş, tüm veriler aynı geometrik düzen içinde kaydedilmiştir.

3.1.3 Deney Bulguları

Cornell kutusu deneyinde elde edilen ışıklılık değerleri, tablo ve grafikler aracılığıyla karşılaştırılmıştır. Ölçümler, kırmızı, yeşil ve beyaz yüzeyler üzerinde gerçekleştirilmiş ve her yüzeydeki 16 ölçüm noktasından elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

Deney bulguları, farklı sıvıların yüzey ışıklılığı üzerindeki etkilerini ortaya koymakta ve sıvıların yansıma, saçılma ve emilim özelliklerinin yüzeylerdeki ışık dağılımına olan katkılarını göstermektedir. Ölçüm verileri, ortalama değerler, standart sapma ve yüzeyler arası karşılaştırmalar şeklinde tablo ve grafiklerle sunulmuştur. Bu sayede, yüzeylerin ışıklılık dağılımı ve sıvıların ışığı nasıl etkilediği açık bir şekilde gözlemlenebilmiştir. Bu veriler, sanal sahne deneyinde kullanılacak modelin doğruluk kontrolü için de temel referans olarak alınmıştır.

Tablo 3.5 Cornell kutusunun kırmızı yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²)

Sıvılar	L01	L05	L09	L13	L02	L06	L10	L14
Boş bardak	32,68	86,69	66,96	67,11	43,98	121,5	91,86	98,54
Su	34,24	90,5	71,48	75,1	44,79	123,8	96,42	107,6
Süt	33,39	89,28	70,71	73,92	47,81	123,8	95,97	107,3
Zeytinyağı	32,58	88,97	70,42	73,42	43,54	124	96,55	107
Beyaz şarap	31,61	87,83	70,23	72,66	43,84	122,9	96,18	105,2
Kırmızı şarap	33,31	87,49	69,09	73,53	44,31	121,5	94,9	104,2
Bira	31,65	88,53	69,91	72,68	42,82	123	95,05	105,4
Bal	32,95	90,92	71,45	73,89	43,99	123,7	95,76	106,6
Üzüm sirkesi	34,35	91,49	71,89	108,2	44,37	127,6	97,97	107,8

Tablo 3.6 Cornell kutusunun kırmızı yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²)

Sıvılar	L03	L07	L11	L15	L04	L08	L12	L16
Boş bardak	42,53	120,1	99,59	106,1	36,35	104,1	91,74	79,04
Su	44,39	124,3	103,2	113,8	37,66	105,3	96,67	98,34
Süt	46,96	121,1	104,4	115,1	38,54	105,7	115,9	94,22
Zeytinyağı	42,33	132,8	111,9	113,8	38,2	110,3	110,1	85,89
Beyaz şarap	43,3	120,8	104,2	112,9	38,3	100,9	98,3	82,78
Kırmızı şarap	40,89	132,2	101,5	111,6	37,91	117,7	93,84	86,25
Bira	45,78	120,5	101,9	112,9	34,14	106,3	96,41	92,96
Bal	42,35	124,7	103,3	112,8	39,61	105,5	94,99	88,45
Üzüm sirkesi	44,32	149,5	113,1	115,3	37,98	120,9	107,8	94,52

Tablo 3.7 Cornell kutusunun beyaz yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²)

Sıvılar	L17	L21	L25	L29	L18	L22	L26	L30
Boş bardak	275	363	366	350	349	480	482	350
Su	276	365	365	276	351	482	485	351
Süt	274	362	359	275	353	481	481	354
Zeytinyağı	279	361	361	275	354	485	486	353
Beyaz şarap	277	364	368	279	352	483	484	354
Kırmızı şarap	273	355	360	348	347	469	472	349
Bira	276	360	365	278	350	478	480	352
Bal	274	359	358	274	347	474	475	348
Üzüm sirkesi	282	368	370	280	357	484	485	355

Tablo 3.8 Cornell kutusunun beyaz yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²)

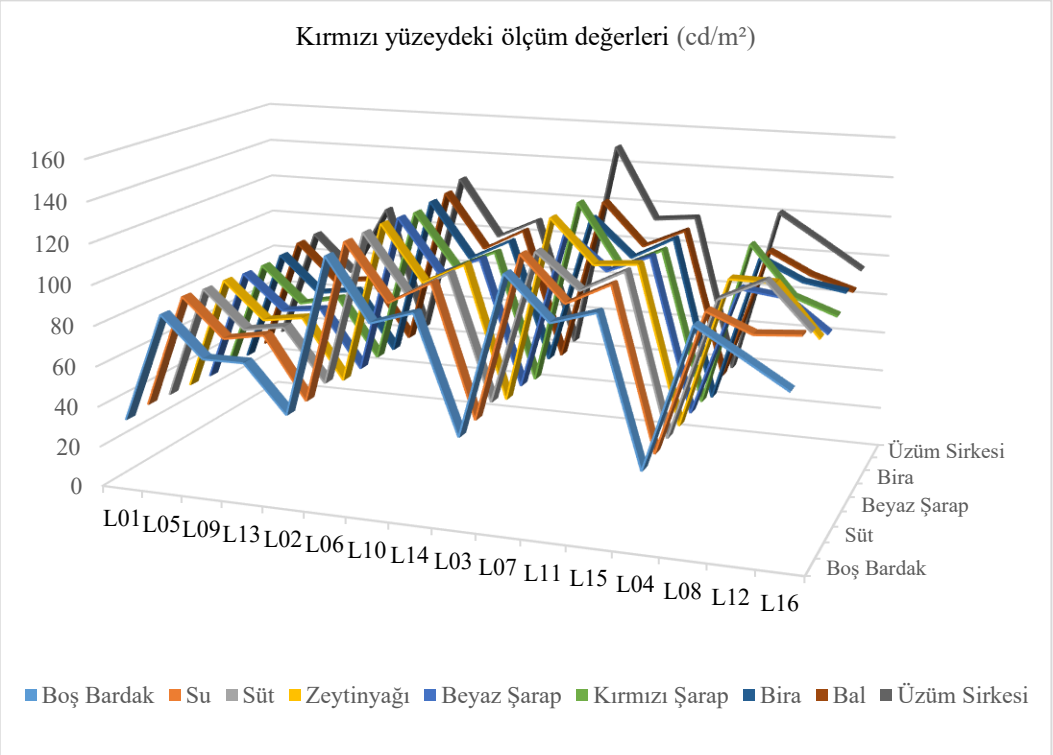
Sıvılar	L19	L23	L27	L31	L20	L24	L28	L32
Boş bardak	356	497	497	357	335	420	421	336
Su	358	502	501	357	336	423	423	337
Süt	361	502	501	360	340	427	424	339
Zeytinyağı	362	506	502	359	340	425	423	344
Beyaz şarap	357	501	501	358	338	422	424	338
Kırmızı şarap	352	489	490	355	333	416	418	335
Bira	355	496	495	357	336	420	422	336
Bal	356	493	492	353	333	420	417	335
Üzüm sirkesi	363	503	502	361	344	430	428	341

Tablo 3.9 Cornell kutusunun yeşil yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²)

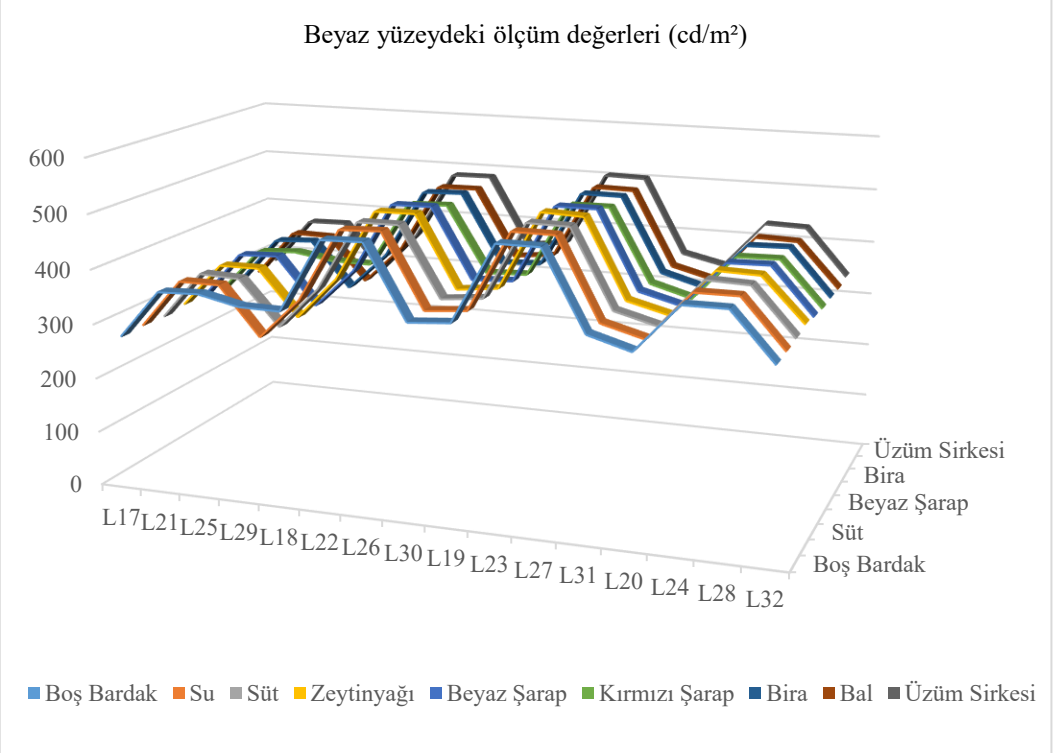
Sıvılar	L33	L37	L41	L45	L34	L38	L42	L46
Boş bardak	71,8	68,2	91	31,8	104	91,7	119	44
Su	72,3	68,4	91	31,5	104	91,7	119	43,7
Süt	70,7	66,3	88,6	31,5	103	90,8	119	44,5
Zeytinyağı	73,4	68,9	91,5	29,5	106	92,5	120	42,4
Beyaz şarap	72,1	67,4	89,8	30,1	104	90,9	119	43,6
Kırmızı şarap	71,3	66,4	88,1	28,7	103	90,3	117	39,6
Bira	72,1	67,1	89,9	30,4	104	90,7	119	41,6
Bal	72,4	66,9	90,1	30,4	104	90,2	118	42,6
Üzüm sirkesi	72,3	67,6	90,3	29,4	105	91	119	41,1

Tablo 3.10 Cornell kutusunun yeşil yüzeyindeki ölçüm değerleri (cd/m²)

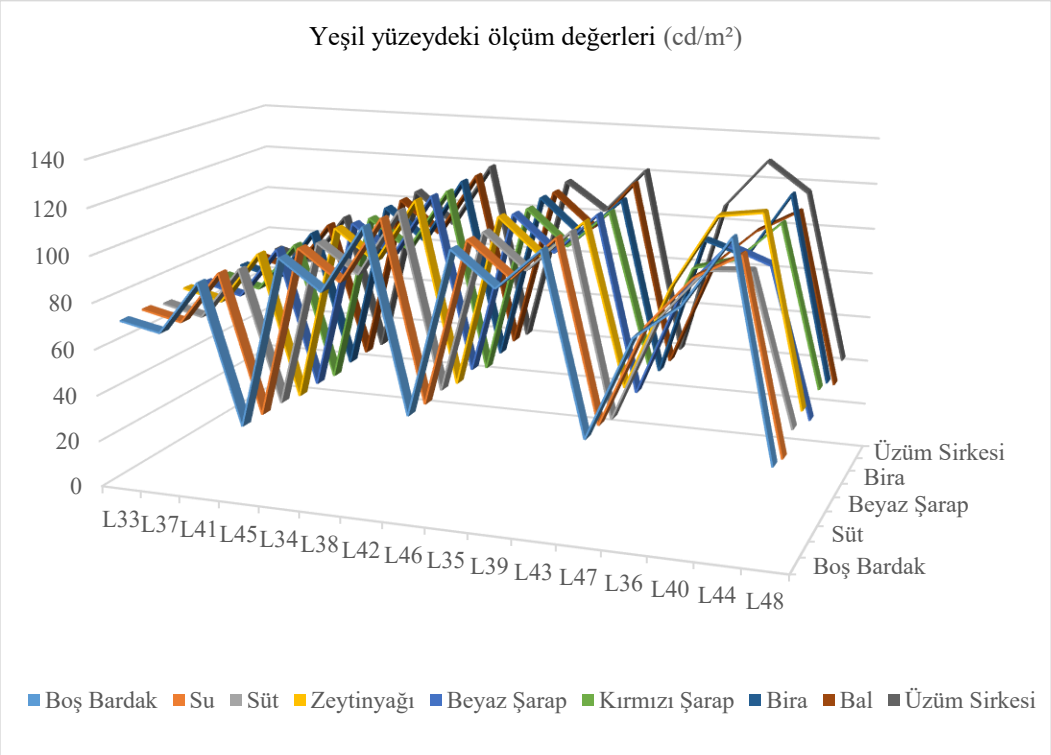
Sıvılar	L35	L39	L43	L47	L36	L40	L44	L48
Boş bardak	113	99,1	116	42,2	84,4	98,4	126	39,4
Su	113	99	117	42,5	84,8	105	115	36,8
Süt	113	98,3	115	39,7	83	104	105	43,1
Zeytinyağı	116	100	116	47,9	91,8	122	125	45,5
Beyaz şarap	113	98	115	40,7	85,8	106	99,6	36,1
Kırmızı şarap	112	96,9	113	48	91,7	96,7	114	44,2
Bira	114	98,1	115	40,4	100	94,1	122	42
Bal	113	97,8	119	40,2	85,2	101	111	36,2
Üzüm sirkesi	114	102	122	40,7	108	129	116	42,4



Şekil 3.10 Kırmızı yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği



Şekil 3.11 Beyaz yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği



Şekil 3.12 Yeşil yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği

Ölçümlerde kırmızı ve yeşil yüzey değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 3.5; Tablo 3.6; Tablo 3.9; Tablo 3.10; Şekil 3.10; Şekil 3.12). Buna karşılık, beyaz yüzey değerlerinin kırmızı ve yeşil değerlerden farklı olduğu belirlenmiştir (Tablo 3.7; Tablo 3.8; Şekil 3.11). Kırmızı ve yeşil yüzeyler ışık kaynağına göre aynı açı ve konumda bulunurken, beyaz yüzeyin açısı ve konumu farklıdır. Bu durum, yüzeylerin ışıklılık değerlerindeki farklılığın yalnızca yüzey geometrisi ve konumundan değil, aynı zamanda renk ve malzeme özelliklerinden kaynaklandığını göstermektedir.

Yüzeylerdeki ışıklılık değeri dört farklı ışık değerinin toplamıdır (Şekil 3.9).

- Armatürden doğrudan direkt ışık,
- Diğer yüzeylerden yansıyarak gelen dolaylı ışık,
- Kadehin cam yüzeyinden yansıyarak gelen dolaylı ışık,
- Kadeh içindeki sıvı tarafından emilip saçıldıktan sonra ulaşan dolaylı ışık

Bu bağlamda, farklı sıvılarla yapılan ölçümlerde değerleri etkileyecek tek unsur kadeh içindeki sıvıdır. Ölçüm değerler, sıvıların farklı renk ve emilim

katsayılarından doğrudan etkilenmektedir. Bu etki, yüzeylerdeki ışıklılık dağılımını değiştirmektedir.

Bu çalışmanın amacı, gerçek bir modelle yapılan bu deneysel bulguların, gerçekçi görüntü sentezi yapan yazılımlarda aynı sonuçları verip vermediğini belirlemektir. Bu sayede hem deneysel hem de sayısal yöntemlerin karşılaştırılması sağlanmakta ve simülasyon sonuçlarının gerçek dünya verileriyle tutarlılığı ortaya konmaktadır.

3.2 Sanal Sahne Deneyi

3.2.1 Deney Kurgusu

Daha önce açıklanan deney, 3D ortamında simüle edilmiştir. Cornell kutusu, armatür ve kadeh gerçek ölçülerine uygun şekilde modellenmiş ve malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Kullanılan armatür, üretici firmanın laboratuvarında yeniden ölçülmüş ve bu değerlere uygun bir IES haritası oluşturulmuştur.

Yüzeylerin RAL renk kodları, RGB değerlerine çevrilerek malzeme özelliklerine işlenmiştir. Görüntü işleme yazılımları olarak V-ray 6.0 ve Corona kullanılmıştır. Yüzey ışıklılık değerleri (cd/m2), V-Ray'de VrayLightingAnalysis render element modülü ile ölçülmüştür. Corona yazılımında ışık analizi modülü bulunmadığından, yüzeylerdeki dolaylı aydınlatma değerleri *dolaylı ışık* render elemanı modülü ile ölçülmüştür.

3.2.2 Sanal Sahne Malzeme Özellikleri

Cam kadeh ve tüm sıvıların malzemeleri tanımlanmadan önce, cam kadeh 3D tarayıcı ile taranmış ve ardından retopology işlemi ile optimize edilmiştir. Armatür aydınlatmasındaki ışık değeri için VRayIES light kullanılmıştır.

Kırmızı, yeşil ve beyaz yüzeylerin malzemeleri şu parametrelerle tanımlanmıştır:

- Diffuse – Roughness
- Reflection – Glossiness
- Fresnel Reflection

Cam kadeh ve tüm sıvıların malzemeleri şu parametrelerle tanımlanmıştır:

- Diffuse – Roughness
- Reflection – Glossiness

- Fresnel Reflection
- Refraction – Glossiness– IOR
- Translucency – Fog Color– Depth (cm)

3.2.3 Sanal Sahne Deney Bulguları

Cornell kutusu ve sıvıların V-ray 6 yazılımı ile oluşturulmuş gerçekçi görüntü işlemeleri (Şekil 3.13; Şekil 3.14; Şekil 3.15):



Boş Kadeh Su Süt

Şekil 3.13 Boş kadeh, su ve süt V-ray gerçekçi görüntü işlemeleri



Zeytinyağı Beyaz şarap Kırmızı şarap

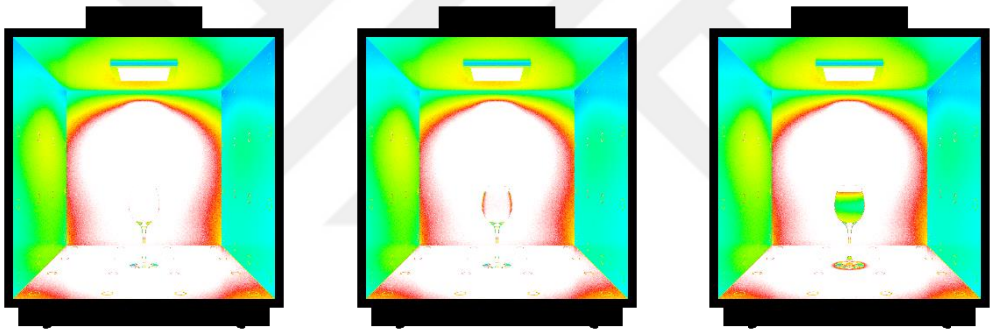
Şekil 3.14 Zeytinyağı, beyaz şarap ve kırmızı şarap V-ray gerçekçi görüntü işlemeleri



Bira Bal Üzüm sirkesi

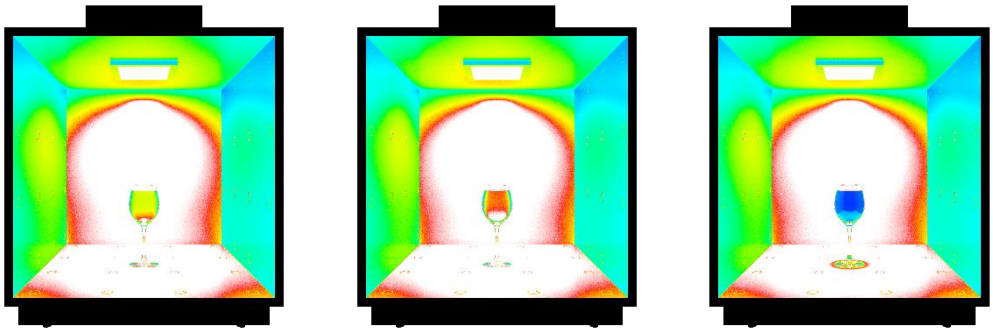
Şekil 3.15 Bira, bal ve üzüm sirkesi V-ray gerçekçi görüntü işlemeleri

Cornell kutusu ve sıvıların V-ray 6 yazılımı ile oluşturulmuş ışık analizi işlemeleri (Şekil 3.16; Şekil 3.17; Şekil 3.18):



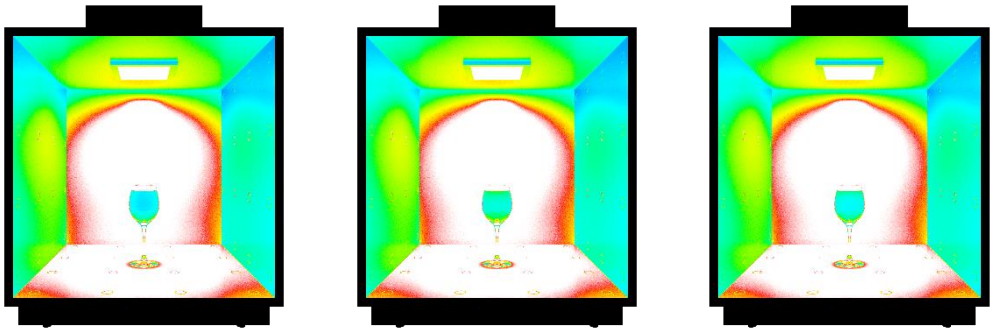
Boş Kadeh Su Süt

Şekil 3.16 Boş kadeh, su ve süt V-ray ışık analiz işlemeleri



Zeytinyağı Beyaz şarap Kırmızı şarap

Şekil 3.17 Zeytinyağı, beyaz şarap ve kırmızı şarap V-ray ışık analiz işlemeleri



Bira Bal Üzüm sirkesi

Şekil 3.18 Bira, bal ve üzüm sirkesi V-ray ışık analiz işlemeleri

Cornell kutusu içerisinde yer alan farklı sıvıların yüzey ışıklılık değerleri, VrayLightingAnalysis modülü aracılığıyla ölçülmüştür. Ölçümler, kutunun kırmızı, yeşil ve beyaz yüzeylerinde tanımlanmış L01–L48 numaralı noktalardan alınmıştır. Elde edilen veriler, boş bardak ile su, süt, zeytinyağı, beyaz şarap, kırmızı şarap, bira, bal ve üzüm sirkesi sıvılarını içeren durumlar için ayrı ayrı kaydedilmiş ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 3.11 Kırmızı yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²)

Sıvılar	L01	L05	L09	L13	L02	L06	L10	L14
Boş bardak	121	285	252	252	152	421	334	330
Su	120	284	251	252	151	421	333	329
Süt	119	284	248	253	149	419	334	332
Zeytinyağı	118	283	249	251	151	420	331	329
Beyaz şarap	120	284	251	252	152	420	332	329
Kırmızı şarap	114	269	248	249	144	415	326	325
Bira	116	282	250	250	147	417	328	327
Bal	118	282	243	251	146	418	330	329
Üzüm sirkesi	120	282	243	251	148	418	330	328

Tablo 3.12 Kırmızı yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²)

Sıvılar	L03	L07	L11	L15	L04	L08	L12	L16
Boş bardak	165	364	345	348	162	339	325	254
Su	163	363	345	348	160	338	324	254
Süt	164	362	339	346	160	338	327	258
Zeytinyağı	162	363	339	347	157	339	324	253
Beyaz şarap	163	363	340	347	158	339	324	254
Kırmızı şarap	158	359	336	344	154	334	324	254
Bira	160	364	337	344	155	335	322	252
Bal	160	365	338	346	154	336	322	254
Üzüm sirkesi	161	365	339	346	156	336	325	253

Tablo 3.13 Beyaz yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²)

Sıvılar	L17	L21	L25	L29	L18	L22	L26	L30
Boş bardak	591	798	787	683	782	1047	1038	882
Su	590	796	790	682	785	1044	1037	881
Süt	591	789	791	681	785	1064	1036	753
Zeytinyağı	587	785	789	681	779	1038	1033	879
Beyaz şarap	589	792	790	682	780	1042	1035	880
Kırmızı şarap	583	767	786	677	774	1057	1027	743
Bira	584	773	787	679	776	1059	1029	745
Bal	589	773	788	679	777	1037	1031	750
Üzüm sirkesi	586	771	787	679	777	1061	1031	746

Tablo 3.14 Beyaz yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²)

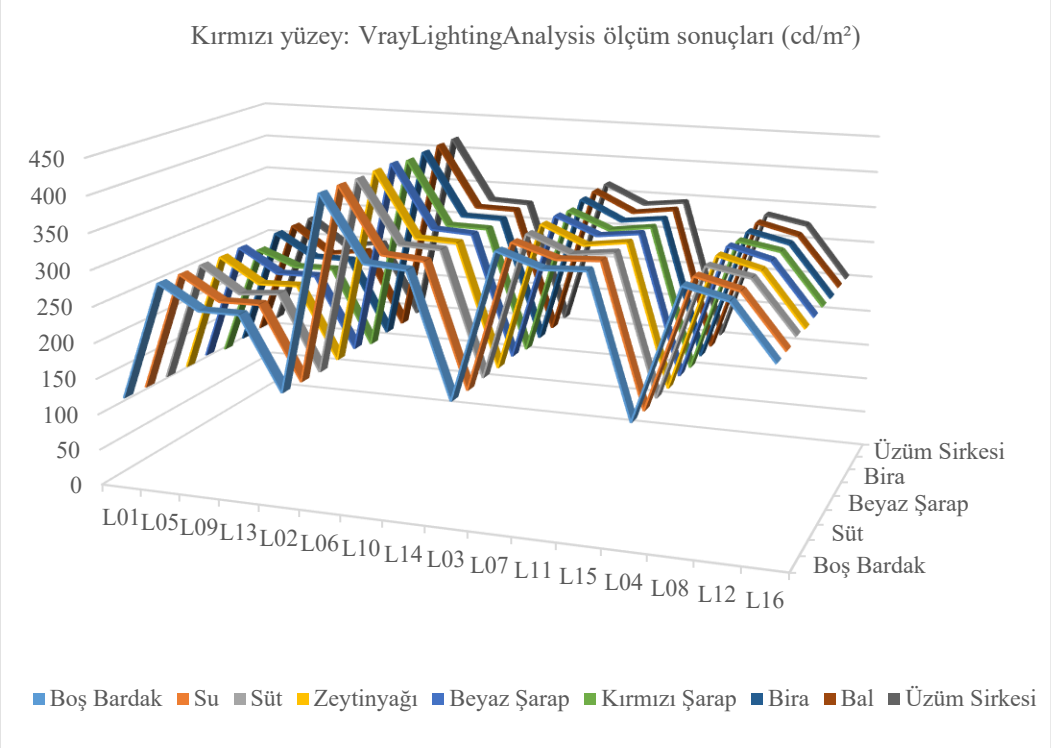
Sıvılar	L19	L23	L27	L31	L20	L24	L28	L32
Boş bardak	810	892	944	760	817	1049	1026	858
Su	809	897	949	759	818	1048	1025	857
Süt	804	884	964	758	819	996	1062	858
Zeytinyağı	807	881	945	757	809	1045	1023	855
Beyaz şarap	809	895	947	758	817	1047	1024	857
Kırmızı şarap	802	874	938	751	807	1041	1048	852
Bira	804	889	942	753	808	1042	1013	853
Bal	806	881	945	753	808	991	1024	854
Üzüm sirkesi	805	891	944	753	811	1043	1022	854

Tablo 3.15 Yeşil yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²)

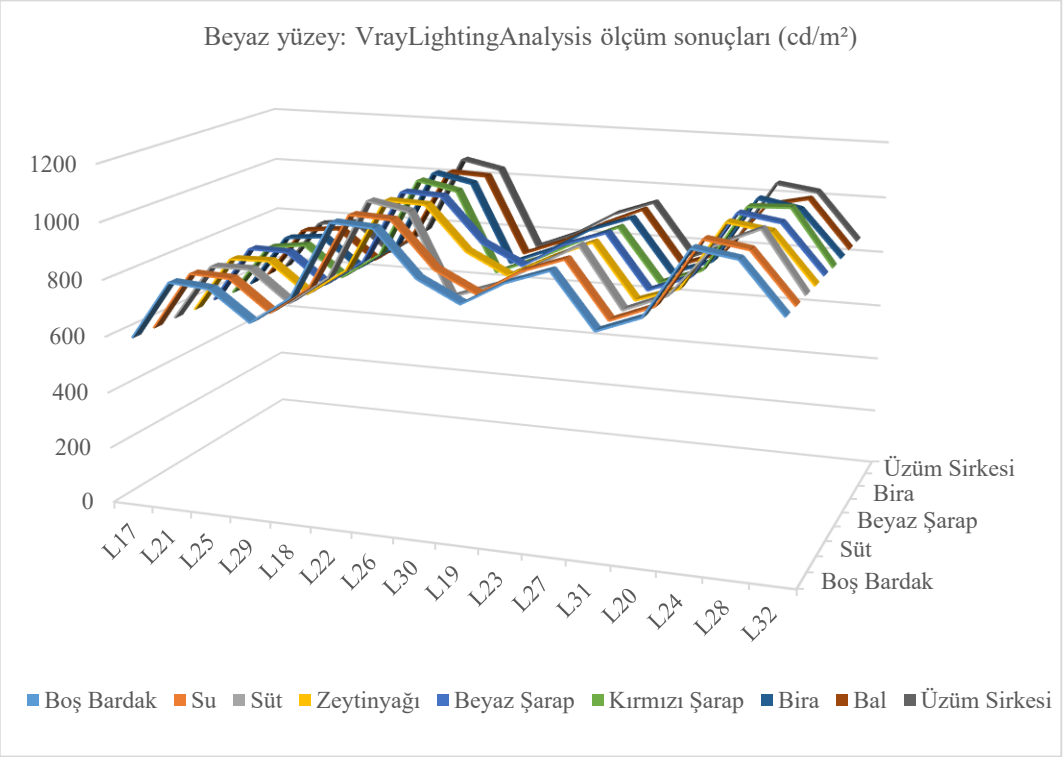
Sıvılar	L33	L37	L41	L45	L34	L38	L42	L46
Boş bardak	181	190	208	84,1	305	218	242	99
Su	181	183	207	83,5	305	218	244	97,1
Süt	184	182	207	83,8	301	218	237	96,3
Zeytinyağı	180	181	206	81,5	299	217	243	95,4
Beyaz şarap	180	182	207	82,7	300	218	244	97,5
Kırmızı şarap	180	177	205	78,1	297	216	241	94,3
Bira	179	180	205	79,6	298	216	241	95
Bal	180	180	205	80	299	217	242	95,4
Üzüm sirkesi	179	180	205	79,3	298	217	241	95,4

Tablo 3.16 Yeşil yüzey: VrayLightingAnalysis ölçüm sonuçları (cd/m²)

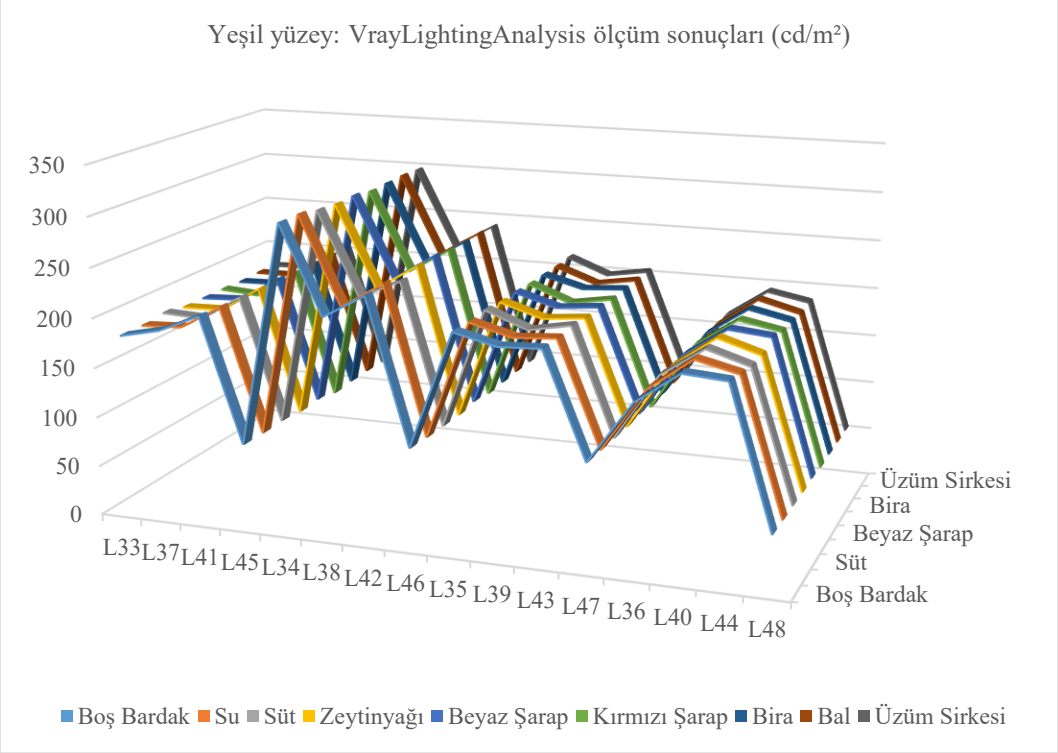
Sıvılar	L35	L39	L43	L47	L36	L40	L44	L48
Boş bardak	215	205	207	104	165	196	193	55,6
Su	214	203	206	103	166	198	188	55
Süt	216	200	208	102	168	197	184	54,7
Zeytinyağı	214	201	205	101	166	197	184	54
Beyaz şarap	214	202	206	102	166	195	191	54,5
Kırmızı şarap	213	197	204	97,1	165	194	186	52,6
Bira	213	202	205	99,3	166	195	186	53,2
Bal	213	198	205	99,6	165	195	184	53,3
Üzüm sirkesi	214	198	205	100	165	194	186	53,3



Şekil 3.19 Kırmızı yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği



Şekil 3.20 Beyaz yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği



Şekil 3.21 Yeşil yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği

Cornell kutusu ve sıvıların Corona 11 yazılımı ile oluşturulmuş gerçekçi görüntü işlemeleri (Şekil 3.22; Şekil 3.23; Şekil 3.24):



Boş Kadeh Su Süt

Şekil 3.22 Boş kadeh, su ve süt Corona gerçekçi görüntü işlemeleri



Zeytinyağı Beyaz şarap Kırmızı şarap

Şekil 3.23 Zeytinyağı, beyaz şarap ve kırmızı şarap Corona gerçekçi görüntü işlemeleri



Bira Bal Üzüm sirkesi

Şekil 3.24 Bira, bal ve üzüm sirkesi Corona gerçekçi görüntü işlemeleri

Cornell kutusu ve sıvıların Corona 11 yazılımı ile oluşturulmuş dolaylı ışık analizi işlemeleri (Şekil 3.25; Şekil 3.26; Şekil 3.27):



Boş Kadeh Su Süt

Şekil 3.25 Boş kadeh, su ve süt Corona dolaylı ışık analizi işlemeleri



Zeytinyağı Beyaz şarap Kırmızı şarap

Şekil 3.26 Zeytinyağı, beyaz şarap ve kırmızı şarap Corona dolaylı ışık analizi işlemeleri



Bira Bal Üzüm sirkesi

Şekil 3.27 Bira, bal ve üzüm sirkesi Corona dolaylı ışık analizi işlemeleri

Corona 11 yazılımı, görsel açıdan yüksek kaliteli ve fotogerçekçi işlemeler üretebilmesine rağmen, diğer bazı işleme motorlarında bulunan fiziksel ışık ölçüm modüllerine (örneğin. VRayLightingAnalysis) sahip değildir. Sahne içerisindeki ışık yoğunluklarını doğrudan cd/m² veya fiziksel birimlerle ölçülememektedir. Bu nedenle, Corona 11 yazılımı ile oluşturulan sahnelerden elde edilen EXR formatındaki yüksek dinamik aralıklı işlemeler kullanılarak ışık analizleri gerçekleştirilmiştir. İşlemeler, Photoshop ya da Python tabanlı scriptler aracılığıyla açılmış, belirli yüzeyler seçilerek her yüzeyin ortalama, minimum ve maksimum lineer RGB değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen değerler, sahne ayarları ve ışık güçleri göz önünde bulundurularak cd/m² cinsine dönüştürülmüştür.

Ölçülen RGB değerlerini fiziksel birime çevirmek için;

$$L_{cd/m^2} = \frac{Lineer\ RGB\ Value\ \times Light\ Multipler}{Exposure\ Factor} \tag{2.12}$$

Light Multiplier: Corona ışık kaynağı gücü

Exposure Factor: Kamera ayarları (ISO, Shutter, f-stop)

Tablo 3.17 Kırmızı yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²)

Sıvılar	L01	L05	L09	L13	L02	L06	L10	L14
Boş bardak	95,59	225,2	199,1	199,1	120,1	332,6	263,9	260,7
Su	94,8	224,4	198,3	199,1	119,3	332,6	263,1	259,9
Süt	94,01	224,4	195,9	199,9	117,7	331	263,9	262,3
Zeytinyağı	93,22	223,6	196,7	198,3	119,3	331,8	261,5	259,9
Beyaz şarap	94,8	224,4	198,3	199,1	120,1	331,8	262,3	259,9
Kırmızı şarap	90,06	212,5	195,9	196,7	113,8	327,9	257,5	256,8
Bira	91,64	222,8	197,5	197,5	116,1	329,4	259,1	258,3
Bal	93,22	222,8	192	198,3	115,3	330,2	260,7	259,9
Üzüm sirkesi	94,8	222,8	192	198,3	116,9	330,2	260,7	259,1

Tablo 3.18 Kırmızı yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²)

Sıvılar	L03	L07	L11	L15	L04	L08	L12	L16
Boş bardak	130,4	287,6	272,6	274,9	128	267,8	256,8	200,7
Su	128,8	286,8	272,6	274,9	126,4	267	256	200,7
Süt	129,6	286	267,8	273,3	126,4	267	258,3	203,8
Zeytinyağı	128	286,8	267,8	274,1	124	267,8	256	199,9
Beyaz şarap	128,8	286,8	268,6	274,1	124,8	267,8	256	200,7
Kırmızı şarap	124,8	283,6	265,4	271,8	121,7	263,9	256	200,7
Bira	126,4	287,6	266,2	271,8	122,5	264,7	254,4	199,1
Bal	126,4	288,4	267	273,3	121,7	265,4	254,4	200,7
Üzüm sirkesi	127,2	288,4	267,8	273,3	123,2	265,4	256,8	199,9

Tablo 3.19 Beyaz yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²)

Sıvılar	L17	L21	L25	L29	L18	L22	L26	L30
Boş bardak	467	630	622	540	618	827	820	697
Su	466	629	624	539	620	825	819	696
Süt	467	623	625	538	620	841	818	595
Zeytinyağı	464	620	623	538	615	820	816	694
Beyaz şarap	465	626	624	539	616	823	818	695
Kırmızı şarap	461	606	621	535	611	835	811	587
Bira	461	611	622	536	613	837	813	589
Bal	465	611	623	536	614	819	814	593
Üzüm sirkesi	463	609	622	536	614	838	814	589

Tablo 3.20 Beyaz yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²)

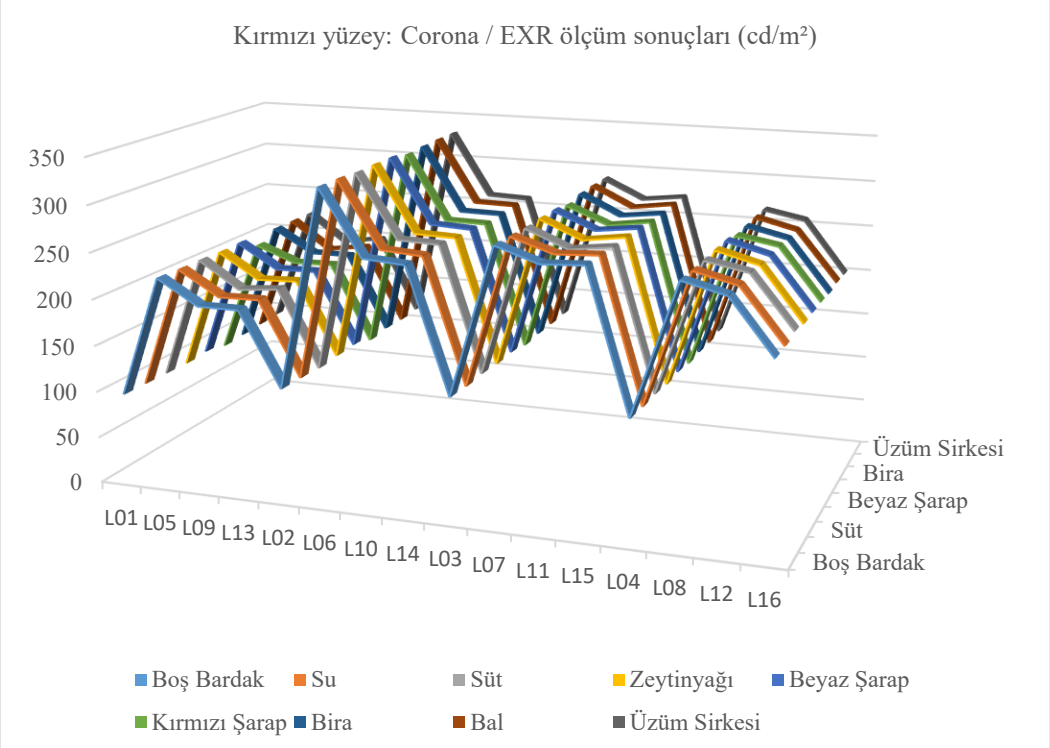
Sıvılar	L19	L23	L27	L31	L20	L24	L28	L32
Boş bardak	640	705	746	600	645	829	811	678
Su	639	709	750	600	646	828	810	677
Süt	635	698	762	599	647	787	839	678
Zeytinyağı	638	696	747	598	639	826	808	675
Beyaz şarap	639	707	748	599	645	827	809	677
Kırmızı şarap	634	690	741	593	638	822	828	673
Bira	635	702	744	595	638	823	800	674
Bal	637	696	747	595	638	783	809	675
Üzüm sirkesi	636	704	746	595	641	824	807	675

Tablo 3.21 Yeşil yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²)

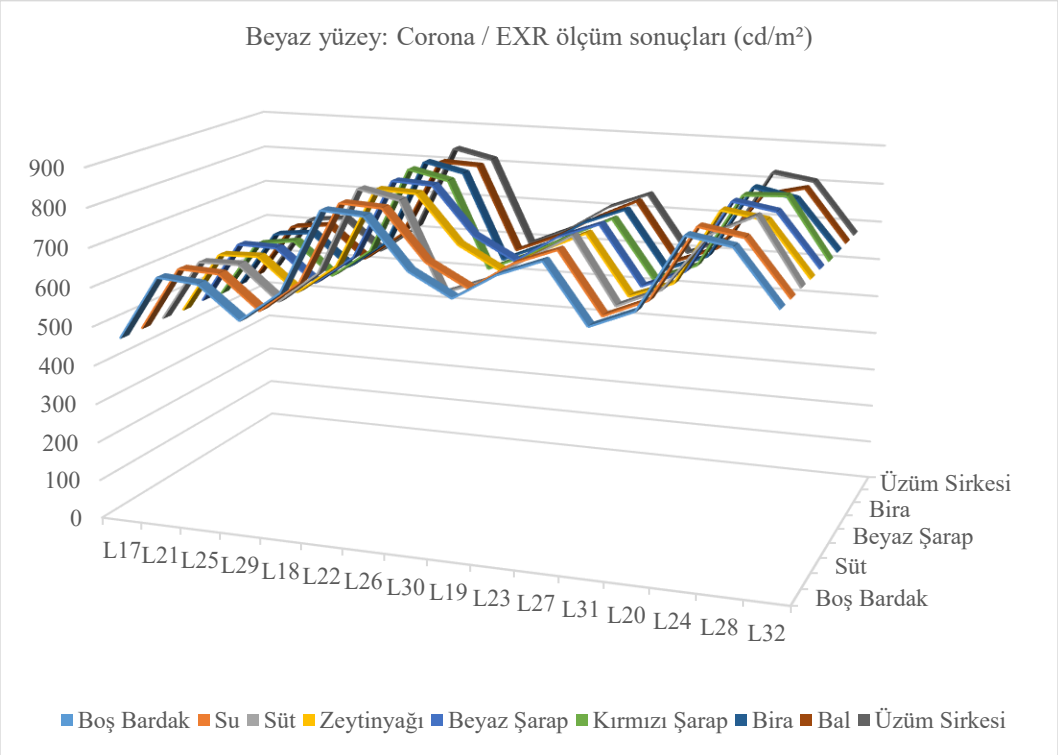
Sıvılar	L33	L37	L41	L45	L34	L38	L42	L46
Boş bardak	143	150	164	66,4	241	172	191	78,2
Su	143	145	164	66	241	172	193	76,7
Süt	145	144	164	66,2	238	172	187	76,1
Zeytinyağı	142	143	163	64,4	236	171	192	75,4
Beyaz şarap	142	144	164	65,3	237	172	193	77
Kırmızı şarap	142	140	162	61,7	235	171	190	74,5
Bira	141	142	162	62,9	235	171	190	75,1
Bal	142	142	162	63,2	236	171	191	75,4
Üzüm sirkesi	141	142	162	62,6	235	171	190	75,4

Tablo 3.22 Yeşil yüzey: Corona / EXR ölçüm sonuçları (cd/m²)

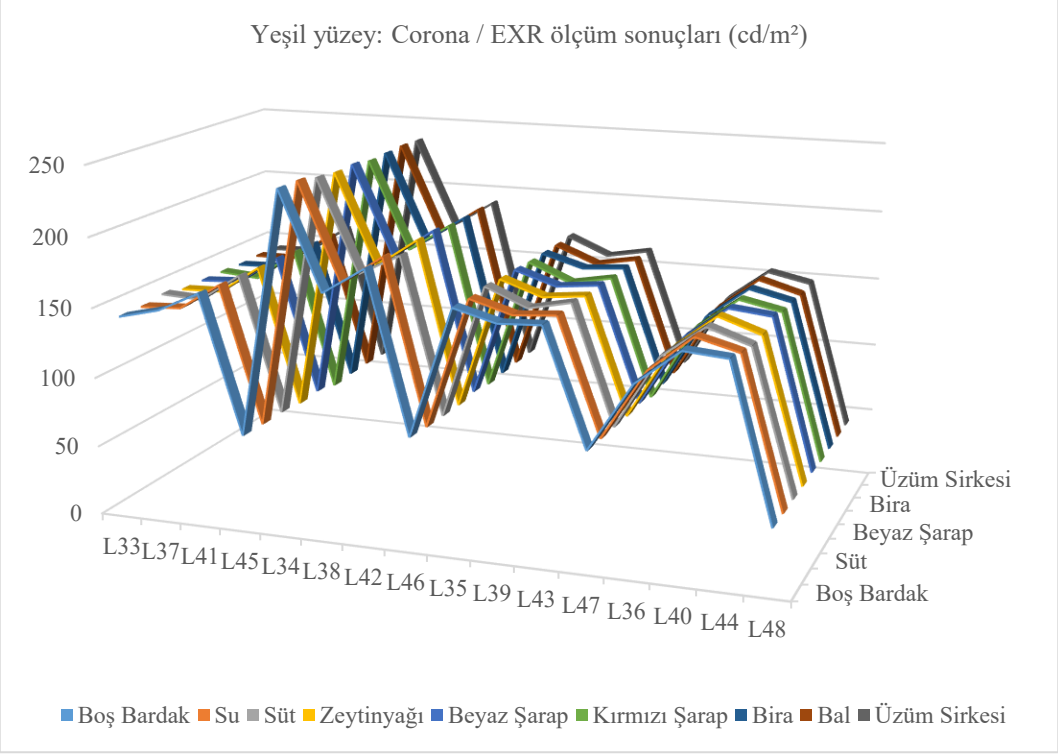
Sıvılar	L35	L39	L43	L47	L36	L40	L44	L48
Boş bardak	170	162	164	82,2	130	155	152	43,9
Su	169	160	163	81,4	131	156	149	43,5
Süt	171	158	164	80,6	133	156	145	43,2
Zeytinyağı	169	159	162	79,8	131	156	145	42,7
Beyaz şarap	169	160	163	80,6	131	154	151	43,1
Kırmızı şarap	168	156	161	76,7	130	153	147	41,6
Bira	168	160	162	78,4	131	154	147	42
Bal	168	156	162	78,7	130	154	145	42,1
Üzüm sirkesi	169	156	162	79	130	153	147	42,1



Şekil 3.28 Kırmızı yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği



Şekil 3.29 Beyaz yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği



Şekil 3.30 Yeşil yüzeydeki ışıklılık değer değişim grafiği

Elde edilen bulgular, V-Ray ve Corona yazılımlarıyla gerçekleştirilen sanal sahne deneylerinin, gerçek model üzerinde yapılan ölçümlerle tam olarak örtüşmediğini ortaya koymaktadır (Tablo 3.11; Tablo 3.12; Tablo 3.13; Tablo 3.14; Tablo 3.15; Tablo 3.16; Tablo 3.17; Tablo 3.18; Tablo 3.19; Tablo 3.20; Tablo 3.21; Tablo 3.22; Şekil 3.19; Şekil 3.20; Şekil 3.21; Şekil 3.28; Şekil 3.29; Şekil 3.30). Gerçekçi görüntü sentezi yeteneğine sahip bu yazılımlar, Cornell kutusunun renkli yüzeylerindeki ışıklılık değerlerini büyük ölçüde sabit tutarken yalnızca kadehin tabanında yer alan beyaz yüzeyde (L22, L23, L26 ve L27 noktaları) belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılık, kadeh içerisindeki farklı renk ve şeffaflıktaki sıvıların oluşturduğu gölge etkilerinden kaynaklanmaktadır. Bulgular, yazılımların ışık hesaplamalarında sıvıların emilim ve saçılım etkilerini dikkate almadığını göstermektedir. Dolayısıyla, sanal sahne tabanlı deneylerin gerçek dünyadaki optik davranışları tam olarak yansıtmakta belirli sınırlılıklar taşıdığı sonucuna ulaşılmaktadır.

4
ALGORİTMA

Önerilen algoritma, katılımcı medya aydınlatma modellerinde ışığın emilim ve saçılım etkilerini veri odaklı BRDF yaklaşımıyla temsil etmeyi amaçlamaktadır. Algoritma, malzemelerin optik özellikleri ile ışığın malzeme içindeki dağılımı arasındaki ilişkiyi hesaplayarak fiziksel olarak tutarlı simülasyonlar üretir. Bu algoritma, Open Shading Language (OSL) kullanılarak geliştirilmiş olup, farklı malzemeler ve sıvılar üzerinde esnek ve yüksek doğrulukta ışık hesaplamaları yapabilmektedir.

4.1 Algoritma Yapısı

Katılımcı medya aydınlatma modellerinde, bir ortama giren ışık, ortamın yoğunluğuna ve homojenliğine bağlı olarak emilir ve saçılır. Bu modeller, karmaşık hesaplamalar gerektirdiği için yüksek donanımlara ihtiyaç duymakta ve işlemler genellikle uzun zaman süreler almaktadır. Önerilen algoritma, veri odaklı BRDF modellerine benzer bir yaklaşım sunmakta; emilen ve saçılan ışığın fiziksel özelliklerini BRDF modeli üzerinde temsil etmektedir. Başka bir deyişle, emilen ve saçılan ışığın miktarı ile malzemenin temel optik özellikleri arasında bir bağıntı kurmaktadır.

Malzemelerin ışık emilim değerleri arttığında, görünen renk koyulaşmakta, ışıklılık ve doygunluk değerleri azalmakta, şeffaflık düşmekte ve yansıma ile kırılma miktarı azalmakta; bu nedenle malzeme daha opak bir görünüm kazanmaktadır. Işık saçılımı arttığında ise malzemenin berraklığı azalmakta, ışık malzeme içinde farklı yönlere dağılmakta ve malzeme sınırından çıkan dolaylı ışık miktarı etkilenmektedir. Toplamda eşit olmasına rağmen malzeme sınırından çıkan ya da iletilen ışık bir doğru yönünde azalır. Toplam ışık miktarı sabit kalsa bile malzeme sınırından çıkan ya da iletilen ışığın belirli bir yönde yoğunluğu azalır. Algoritma, hesaplamaları hızlandırmak amacıyla farklı sıvıların emilim ve saçılım katsayıları

ile diğer malzeme özelliklerinin etkilenme oranlarını bir veri havuzunda saklamaktadır. Ölçümler gerçek dünya değerlerine dayandırıldığında, elde edilen sonuçlar fiziksel doğruluğa oldukça yakın olmaktadır.

Işık emilim (*absorption*) değeri artığında;

- Görünen renk (*diffuse*): Malzeme rengini değişir; daha koyu görünür, ışıklılık ve doygunluk değeri azalır,
- Şeffaflık (*opacity*): Şeffaflık değerini azalır; malzeme daha opak görünür,
- Yansıma ve kırılma (*reflection refraction*): Yansıma ve kırılma değeri azalır; ışığı daha az yansıtır ve geçirgenliği düşer.

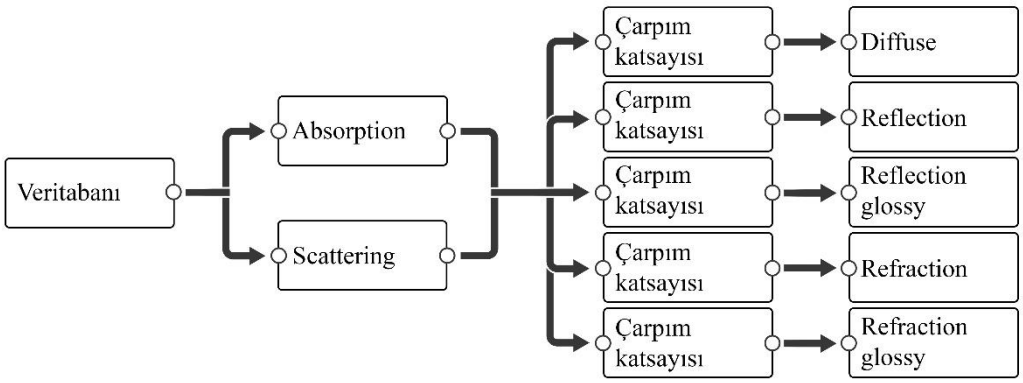
Işık saçılım (*scattering*) değeri artığında;

- Berraklık (*clarity*): Malzeme daha bulanık görünür,
- Işık dağılımı (*scattering*): Malzeme içinde farklı yönlerde ışık dağılır; dolaylı ışık miktarı değişir.

Tablo 4.1 Emilim ve saçılım değerleri ile malzeme özellikleri arasındaki bağıntı

Malzeme özelliği	**Emilim artışı (*absorption*)**	**Saçılım artışı (*scattering*)**
Görünen renk (*diffuse*)	Koyulaşır	–
Işıklılık / Doygunluk (*diffuse*)	Azalır	–
Şeffaflık (*opacity*)	Azalır	–
Yansıma / Kırılma (*reflection refraction*)	Azalır	–
Berraklık (*clarity*)	–	Azalır
Dolaylı ışık miktarı (*indirect lighting*)	–	Etkilenir

Veri odaklı malzeme yapısı, emilim ve saçılım değerleri ile malzeme özellikleri arasındaki bağıntıya göre tanımlanmıştır (Şekil 4.1; Tablo 4.1).



Şekil 4.1 Önerilen algoritma yapısı

4.2 Open Shading Language (OSL) ile Parametre Ekleme

Bu çalışma, diğer gerçekçi görüntü işleme yazılımların analizi ve önerilen parametrelerin kod altyapısının hazırlanması açısından devam etmektedir. Arnold Renderer ve Renderman gibi yazılımların analizleri yapılmaktadır. Ayrıca Sony ImageWorks firması tarafından geliştirilen Open Shading Language (OSL) dili ile önerilen parametrelerin malzemelere eklenmesi planlanmıştır. Open Shading Language (OSL) Arnold, Blender/Cycles, Pixar/Renderman, Chaos/V-ray, Chaos/Corona gibi render işleme yazılımları ile entegre çalışmaktadır.

Veri odaklı malzeme yapısı, önerilen algoritmanın özelliklerine göre tanımlanmıştır (Şekil 4.1). Önerilen algoritma, katılımcı medya aydınlatma modellerinde ışığın emilim ve saçılım etkilerini veri odaklı BRDF yaklaşımıyla temsil etmeyi amaçlamaktadır ve malzemelerin optik özellikleri ile ışığın malzeme içindeki dağılımı arasındaki ilişkiyi hesaplamaktadır.

Bu çalışmada, algoritmanın kod altyapısı ve malzeme parametrelerinin uygulanması açısından diğer gerçekçi görüntü işleme yazılımları da incelenmektedir; bunlar arasında Arnold Renderer ve Renderman gibi işleme yazılımları bulunmaktadır. Önerilen parametrelerin malzemelere eklenmesi için Sony ImageWorks tarafından geliştirilen Open Shading Language (OSL) kullanılacaktır. OSL, fiziksel olarak doğru malzeme ve ışık hesaplamalarının

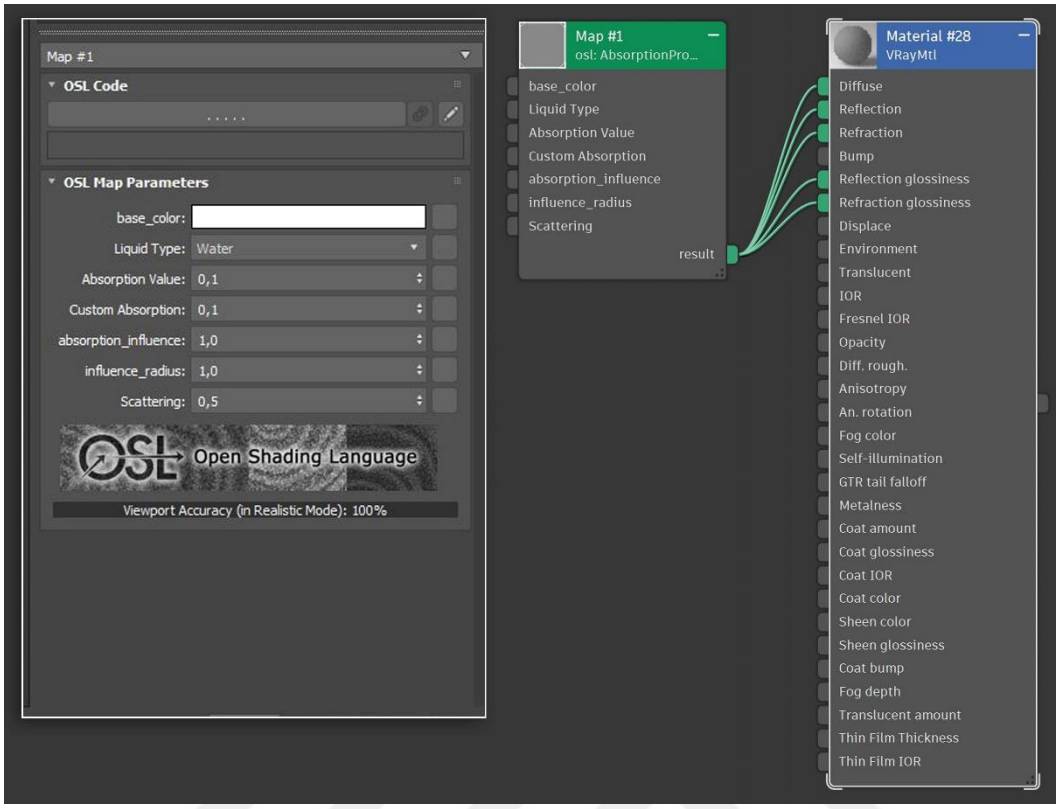
programlanmasına olanak tanıyan bir malzeme gölgelendirme dilidir ve Arnold, Blender/Cycles, Pixar/Renderman, Chaos/V-Ray ve Chaos/Corona gibi modern işleme motorları ile entegre çalışabilmektedir. Bu sayede, algoritma tarafından hesaplanan ışık emilim ve saçılım etkileri, malzemelere yüksek doğrulukla uygulanabilecek ve simülasyon sonuçları gerçek dünya değerlerine daha yakın hâle getirilebilecektir.

4.2.1 Shader Değişkenleri

OSL kodu içinde kullanılan değişken ve bunların türleri görülmektedir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2 OSL ile hazırlanan kodun Shader değişkenleri

Değişken	Tür	Açıklama	Varsayılan değer
base_color	color	Malzemenin temel rengi	color(1.0, 1.0, 1.0)
liquid_type	int	Sıvı tipi (Water, Milk, Beer, …, Other)	0
Absorption_value	float	Seçilen sıvının absorption değeri	0.1
custom_absorption	float	“Other” sıvısı için absorption değeri	0.1
absorption_influence	float	Çevresel absorption etkisi	1.0
influence_radius	float	Çevresel etkilerin etki yarıçapı	1.0
scattering	float	Malzeme içi ışık saçılım oranı	0.5
result	output color	Hesaplanan son renk	color(1.0, 1.0, 1.0)



Şekil 4.2 OSL gölgeleyici yapısı ve OSL arayüz

Yukarıda açıklanan değişkenlere göre hazırlanan OSL kodu, taban malzemesinin difüz kanalına bağlanır (Şekil 4.2). Bu sayede malzemeye giren ışığın, emildikten sonra çevreyi ve kendisini etkilemesi tanımlanır. Ayrıca veri girişi için kolay bir arayüz sağlanır (Şekil 4.2).

4.2.2 Shader Kodu

```
shader AbsorptionProximity(
   color base_color = color(1.0, 1.0, 1.0),
   int liquid_type = 0
   [[ string widget = "mapper",
      string options =
"Water:0|Milk:1|Beer:2|OliveOil:3|Honey:4|GrapeVinegar:5|WhiteWine:6|Red
Wine:7|Other:8",
      string label = "Liquid Type" ]],
   float absorption_value = 0.1
```

```
    [[ string label = "Absorption Value", float min = 0.0, float max = 1.0 ]],
    float custom_absorption = 0.1
    [[ string label = "Custom Absorption", float min = 0.0, float max = 1.0, string visible_when = "liquid_type == 8" ]],
    float absorption_influence = 1.0,
    float influence_radius = 1.0,
    float scattering = 0.5
    [[ string label = "Scattering", float min = 0.0, float max = 1.0 ]],
    output color result = color(1.0, 1.0, 1.0)
)
{
    float base_absorption;

    // Absorption değerini sıvı tipine göre belirleme
    if (liquid_type == 0) base_absorption = 0.1;
    else if (liquid_type == 1) base_absorption = 0.5;
    else if (liquid_type == 2) base_absorption = 0.3;
    else if (liquid_type == 3) base_absorption = 0.7;
    else if (liquid_type == 4) base_absorption = 0.8;
    else if (liquid_type == 5) base_absorption = 0.6;
    else if (liquid_type == 6) base_absorption = 0.2;
    else if (liquid_type == 7) base_absorption = 0.4;
    else base_absorption = custom_absorption;

    float absorption_display = (liquid_type == 8) ? custom_absorption : base_absorption;

    // Geçerli noktanın object space koordinatı
    point Pobj = transform("object", P);

    // Malzeme içi derinlik (basit yaklaşım: nesne orijine uzaklık)
```

```
    float depth = length(Pobj);

    // Occlusion / Dirt değerini al
    float dirt_value = 0.0;
    if (getattribute("occlusion", dirt_value)) {
        float influence_factor = (dirt_value > 0.0) ? (1.0 - dirt_value) *
absorption_influence : 0.0;
        float adjusted_absorption = absorption_display + influence_factor;

        // Derinlik bazlı absorpsiyon (Beer-Lambert benzeri)
        float absorption_factor = exp(-adjusted_absorption * depth);

        // Derinlik bazlı scattering
        float scatter_factor = exp(-scattering * depth);
        color scattered_color = base_color * scatter_factor + base_color * scattering
* 0.5;

        // Son renk: absorpsiyon ve scattering birleşimi
        result = scattered_color * absorption_factor;
    } else {
        float scatter_factor = exp(-scattering * depth);
        result = base_color * scatter_factor + base_color * scattering * 0.5;
    }
}
```

4.2.3 Algoritmanın Sanal Sahnede Testi

Sanal sahne deneyi, V-Ray malzemelerine yeni gölgeleyici (*shader*) entegre edilerek tekrar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, gerçek maket deneyindeki ışıklılık değerlerinin sanal ortamda yeniden üretilmesi hedeflenmiştir. Deney, yalnızca bal, kırmızı şarap, süt ve bira gibi sıvılar üzerinde uygulanmıştır. Ölçümler, kırmızı, beyaz ve yeşil yüzeyler üzerinde yapılmış ve her yüzeyden 6

farklı noktadan veri toplanmıştır. Deneyin sonunda, her sıvı için yaklaşık emilim ve saçılım katsayıları belirlenmeye çalışılmıştır.



Gerçek maket | V-ray | V-ray + OSL Shader
Absorption: 0,875
Scattering: 0,912

Şekil 4.3 Gerçek maket ile V-ray ve V-ray + OSL gerçekçi görüntü işlemeleri (süt)

Deneysel çalışma sonucunda, süt için;

- Emilim (*absorption*): 0,875
- Saçılım (*scattering*):0,912

değerleri saptanmıştır (Şekil 4.3; Tablo 4.3).

Tablo 4.3 Gerçek maket, V-ray ve V-ray + OSL Shader ölçüm değerleri (süt) (cd/m²)

Cornell kutusu ölçümlerinin karşılaştırılması (süt) (cd/m²)			
Referans Noktaları	**Gerçek maket**	**V-ray**	**V-ray + OSL shader**
L07	121,1	362	166,8
L10	95,97	334	151,8
L21	362	789	358,6
L30	354	753	342,2
L38	90,8	218	99
L41	88,6	207	94



Gerçek maket | V-ray | V-ray + OSL Shader
Absorption: 0,335
Scattering: 0,245

Şekil 4.4 Gerçek maket ile V-ray ve V-ray + OSL gerçekçi görüntü işlemeleri (bira)

Deneysel çalışma sonucunda, bira için;

- Emilim (*absorption*): 0,335
- Saçılım (*scattering*):0,245

değerleri saptanmıştır (Şekil 4.4; Tablo 4.4).

Tablo 4.4 Gerçek maket, V-ray ve V-ray + OSL Shader ölçüm değerleri (bira) (cd/m²)

Cornell kutusu ölçümlerinin karşılaştırılması (bira) (cd/m²)			
Referans Noktaları	**Gerçek maket**	**V-ray**	**V-ray + OSL shader**
L07	120,5	364	182
L10	95,05	328	164
L21	360	773	386,5
L30	352	745	372,5
L38	90,7	216	108
L41	89,9	205	102,3



Gerçek maket | V-ray | V-ray + OSL Shader
Absorption: 0,755
Scattering: 0,115

Şekil 4.5 Gerçek maket ile V-ray ve V-ray + OSL gerçekçi görüntü işlemeleri (bal)

Deneysel çalışma sonucunda, bal için;

- Emilim (*absorption*): 0,755
- Saçılım (*scattering*):0,115

değerleri saptanmıştır (Şekil 4.5; Tablo 4.5).

Tablo 4.5 Gerçek maket, V-ray ve V-ray + OSL Shader ölçüm değerleri (bal) (cd/m²)

Cornell kutusu ölçümlerinin karşılaştırılması (bal) (cd/m²)			
Referans Noktaları	**Gerçek maket**	**V-ray**	**V-ray + OSL shader**
L07	124,7	365	162,2
L10	95,76	330	146,6
L21	359	773	343,5
L30	348	750	333,3
L38	90,2	217	96,4
L41	90,1	205	91,1



Gerçek maket | V-ray | V-ray + OSL Shader
Absorption: 0,785
Scattering: 0,325

Şekil 4.6 Gerçek maket ile V-ray ve V-ray + OSL gerçekçi görüntü işlemeleri (kırmızı şarap)

Deneysel çalışma sonucunda, kırmızı şarap için;

- Emilim (*absorption*): 0,785
- Saçılım (*scattering*):0,325

değerleri saptanmıştır (Şekil 4.6; Tablo 4.6).

Tablo 4.6 Gerçek maket, V-ray ve V-ray + OSL Shader ölçüm değerleri (kırmızı şarap) (cd/m²)

Cornell kutusu ölçümlerinin karşılaştırılması (kırmız şarap) (cd/m²)			
Referans Noktaları	**Gerçek maket**	**V-ray**	**V-ray + OSL shader**
L07	132,2	359	143,6
L10	94,9	326	130,4
L21	355	767	306,8
L30	349	743	297,2
L38	90,3	241	96,4
L41	88,1	205	82

4.3 Görüntü İşleme Yazılımlarında Emilim ve Saçılım Parametrelerinin Karşılaştırılması

Gerçekçi görüntü üretiminde, emilim (*absorption*) ve saçılım (*scattering*) parametreleri, özellikle sıvıların ve yarı şeffaf malzemelerin görsel olarak doğru biçimde temsil edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, farklı dönemlerde geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılan görüntü işleme yazılımlarında bu parametrelerin kullanım biçimleri incelenmiştir (Tablo 4.7).

Tablo 4.7 Gerçekçi görüntü sentezi yapan yazılımların yüzey malzemelerinin emilim ve saçılım parametrelerinin incelenmesi

Yazılım	Emilim (*absorption*)	Saçılım (*scattering* / *SSS*)	Açıklama
V-Ray	0.0-0.1	0.0-0.3	BRDF tabanlı yüzeylerde SSS desteği sınırlı, fiziksel doğruluk orta seviyede
Corona Render	0.0-0.1	0.0-0.2	Basit scattering parametresi mevcut, volumetrik SSS sınırlı
Arnold Render	0.0-0.1	0.0-0.5	Gelişmiş SSS modelleri ile yüksek fiziksel doğruluk sağlar
Renderman	0.0-0.1	0.0-0.5	PBR tabanlı shading ile gelişmiş SSS ve yüzey scattering destekler
Blender Cycles	0.0-0.1	0.0-0.4	Principled BSDF ile yüzey tabanlı SSS simülasyonu yapılabilir
SketchUp Lumion View	0.0	0.0	Yüzeyler için SSS parametresi yok, yalnızca görsel efekt amaçlı
Enscape	0.0	0.0	Fiziksel SSS yok, görselleştirme odaklı
Unreal Engine	0.0-0.05	0.0-0.2	Material Editor ile sınırlı SSS desteği sağlar
Unity	0.0-0.05	0.0-0.2	HDRP/Lit shader ile sınırlı SSS desteği mevcuttur

Tablo 4.7 üzerindeki 0.0 değeri, ilgili parametrenin BRDF tabanlı yüzey malzemelerinde bulunmadığını veya kontrol edilemediğini göstermektedir. Aralık belirtilmiş değerler ise parametrenin mevcut olduğunu ve sınırlı bir kontrol aralığı sunduğunu ifade etmektedir.

BRDF tabanlı yüzey malzemelerinde emilim (*absorption*) ve saçılım / SSS (*scattering / subsurface scattering*) parametrelerinin yazılımlar arasında farklılık gösterdiği görülmektedir. Bazı yazılımlar gelişmiş SSS desteği sunarken, bazıları bu parametreleri yüzeylerde sınırlı ya da hiç sunmamaktadır. Hacim (*volume*) tabanlı malzemelerde ise emilim ve saçılım parametreleri tüm yazılımlarda mevcut olmasına rağmen, fiziksel doğruluk ve uygulanma biçimleri yazılımlara göre değişiklik göstermektedir. Bu durum, şeffaf ve yarı şeffaf malzemelerde ışığın gerçekçi davranışının simülasyonunu etkileyebilmektedir.

5
SONUÇ

Gerçekçi görüntü işleme yazılımlarında, ışığın malzemelerle etkileşimini doğru biçimde simüle etmek kritik öneme sahiptir. Özellikle şeffaf ve yarı şeffaf malzemelerde emilim (*absorption*) ve saçılım / SSS (*scattering / subsurface scattering*) parametreleri, görsel doğruluk açısından belirleyici olmaktadır. Bu çalışmada, Cornell kutu deneyinin hem fiziksel hem de sanal ortamda yürütülmesi ve Open Shading Language (OSL) kullanılarak eksik parametrelerin eklenmesi süreci ele alınmıştır.

Cornell kutu deneyinde, yapılan hassas ölçümler sonucunda kutu yüzeylerindeki ışıklılık değerleri farklı çıkmıştır. Yüzey ışıklılığı, doğrudan ve dolaylı ışık enerjisinin toplamını temsil etmektedir. Dolaylı ışık, yüzeylerden yansıyan ve sıvı içinde emilen ve saçılan ışıktan etkilenmektedir. Ölçümlerdeki farklılık, her sıvının emilim ve saçılma değerlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Buna karşılık, sanal sahne deneylerinde kullanılan yazılımlarda (V-Ray, Corona vb.) Cornell kutu yüzeylerindeki ışıklılık değerlerinin neredeyse aynı olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, ilgili yazılımlardaki malzeme tanımlarında emilim ve saçılım parametresinin bulunmamasıdır. Fiziksel açıdan bakıldığında, dielektrik malzemeler hariç tüm malzemelerin ışık emilim oranı vardır. Eksik parametreler, Open Shading Language (OSL) kullanılarak malzemelere eklenmiş ve deneysel bir çalışma yürütülmüştür. OSL, açık kaynaklı ve birçok yazılım ile entegre çalışabildiği için tercih edilmiştir. Bunun yerine farklı yazılım dilleri de tercih edilebilir. Burada önemli olan, emilim ve saçılım parametresinin gerekliliğinin farkında olunmasıdır.

Sonuç olarak, gerçekçi görüntü işleme yazılımlarında BRDF tabanlı aydınlatma modelleriyle birlikte katılımcı medya modellerinin kullanılması gerekmektedir. Katılımcı medya, hesaplamalara emilim ve saçılma katsayılarının dahil edilmesi

anlamına gelir. Böylece, küresel aydınlatmada nesnelerden ve yüzeylere düşen ışık enerjisi daha doğru bir şekilde tanımlanabilir. Ayrıca, her bir sıvının önceden ölçülmüş emilim ve saçılma değeri tanımlanabilir. Bu yaklaşım, veri odaklı BRDF modelinde olduğu gibi hesaplama maliyetini azaltacaktır ve gerçekçi görüntü sentezinin doğruluğunu artıracaktır.

Bu yöntem, sadece gerçekçi görüntü işleme yazılımlarında değil, yapı bilgi modellemesi, yapı fiziği ve malzeme analizi gibi alanlarda da kritik önem taşımaktadır. Son olarak, tüm ışık simülasyon modellerinde emilim ve saçılma katsayısının dikkate alınması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

Agrawala, M., Ramamoorthi, R., Heirich, A., & Moll, L. (2000). Efficient Image-Based Methods for Rendering Soft Shadows. *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 2000*, 375–384. https://doi.org/10.1145/344779.344954

Akenine-Möller, T., Haines, E., Hoffman, N., Pesce, A., Iwanicki, M., & Hillaire, S. (2018). *Real-Time Rendering Ray-Tracing Addendum, Fourth Edition* (4th Edition). A K Peters / CRC Press.

Arbree, A., Walter, B., & Bala, K. (2008). Single-pass Scalable Subsurface Rendering with Lightcuts. *Computer Graphics Forum*, *27*(2), 507–516. https://doi.org/10.1111/J.1467-8659.2008.01148.X

Arvo, J., & Kirk, D. (1990). Particle transport and image synthesis. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *24*(4), 63–66. https://doi.org/10.1145/97879.97886

Ashikhmin, M., & Premoze, S. (2007). Distribution-based BRDFs. *Technical Representative*.

Ashikhmin, M., & Shirley, P. (2000). An Anisotropic Phong BRDF Model. *Journal of Graphics Tools*, *5*(2), 25–32. https://doi.org/10.1080/10867651.2000.10487522

Bitterli, B., & Jarosz, W. (2017). Beyond points and beams: Higher-dimensional photon samples for volumetric light transport. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *36*(4), 1–12. https://doi.org/10.1145/3072959.3073698

Blinn, J. F. (1977). Models of light reflection for computer synthesized pictures. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *11*(2), 192–198. https://doi.org/10.1145/965141.563893

Cerezo, E., Pérez, F., Pueyo, X., Seron, F. J., & Sillion, F. X. (2005). A survey on participating media rendering techniques. *Visual Computer*, *21*(5), 303–328. https://doi.org/10.1007/s00371-005-0287-1

Christensen, P. H. (2008). Point-Based Approximate Color Bleeding. *Pixar Technical Notes*, *Tech. Rep. 08-01*.

Cohen, M. F. ., & Wallace, J. R. . (1993). *Radiosity and realistic image synthesis* (1st Edition). Academic Press Professional.

Cohen, M. F., Chen, S. E., Wallace, J. R., & Greenberg, D. P. (1988). Progressive refinement approach to fast radiosity image generation. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *22*(4), 75–84. https://doi.org/10.1145/378456.378487

Cook, R. L., Porter, T., & Carpenter, L. (1984). Distributed ray tracing. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *18*(3), 137–145. https://doi.org/10.1145/964965.808590

Cook, R. L., & Torrance, K. E. (1982). A Reflectance Model for Computer Graphics. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *1*(1), 7–24. https://doi.org/10.1145/357290.357293

Delalandre, C., Gautron, P., Marvie, J. E., & François, G. (2011). Transmittance function mapping. *Proceedings of I3D 2011: The 2011 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Game*, 31–38. https://doi.org/10.1145/1944745.1944751

Deng, H., Wang, B., Wang, R., & Holzschuch, N. (2020). A practical path guiding method for participating media. *Computational Visual Media*, *6*(1), 37–51. https://doi.org/10.1007/s41095-020-0160-1

d'Eon, E., & Irving, G. (2011). A Quantized-Diffusion Model for Rendering Translucent Materials. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *30*(4), 1–14. https://doi.org/10.1145/2010324.1964951

Donner, C., & Jensen, H. W. (2005). Light diffusion in multi-layered translucent materials. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *24*(3), 1032–1039. https://doi.org/10.1145/1073204.1073308

Donner, C., Lawrence, J., Ramamoorthi, R., Hachisuka, T., Jensen, H. W., & Nayar, S. (2009). An empirical BSSRDF model. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *28*(3), 1–110. https://doi.org/10.1145/1531326.1531336

Donner, C., Weyrich, T., D'Eon, E., Ramamoorthi, R., & Rusinkiewicz, S. (2008). A layered, heterogeneous reflectance model for acquiring and rendering human skin. *ACM Transactions on Graphics*, *27*(5). https://doi.org/10.1145/1409060.1409093

Dupuy, J., Heitz, E., Iehl, J. C., Poulin, P., & Ostromoukhov, V. (2015). Extracting Microfacet-based BRDF Parameters from Arbitrary Materials with Power Iterations. *Computer Graphics Forum*, *34*(4), 21–30. https://doi.org/10.1111/CGF.12675

Dür, A. (2006). An Improved Normalization for the Ward Reflectance Model. *Journal of Graphics Tools*, *11*(1), 51–59. https://doi.org/10.1080/2151237X.2006.10129215

Dutré, P., Bala, K., & Bekaert, P. (2006). Advanced Global Illumination. In *Advanced Global Illumination* (2nd Edition). A K Peters/CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315365473

Ershov, S., Kolchin, K., & Myszkowski, K. (2001). Rendering Pearlescent Appearance Based On Paint-Composition Modelling. *Computer Graphics Forum*, *20*(3), 227–238. https://doi.org/10.1111/1467-8659.00515

Farrell, T. J., Patterson, M. S., & Wilson, B. (1992). A Diffusion Theory Model of Spatially Resolved, Steady-State Diffuse Reflectance for the Noninvasive Determination of Tissue Optical Properties in Vivo. *Medical Physics*, *19*(4), 879–888. https://doi.org/10.1118/1.596777

Fascione, L., Hanika, J., Pieké, R., Villemin, R., Hery, C., Gamito, M., Emrose, L., & Mazzone, A. (2018). Path tracing in production. *ACM SIGGRAPH 2018 Courses, SIGGRAPH 2018*. https://doi.org/10.1145/3214834.3214864

Frisvad, J. R., Hachisuka, T., & Kjeldsen, T. K. (2014). Directional Dipole Model for Subsurface Scattering. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *34*(1). https://doi.org/10.1145/2682629

Ganovelli, Fabio., Corsini, Massimiliano., Pattanaik, Sumanta., & Di Benedetto, Marco. (2015). *Introduction to computer graphics : a practical learning approach* (1st Edition). CRC Press.

Geisler-Moroder, D., & Dür, A. (2010). A New Ward BRDF Model with Bounded Albedo. *Computer Graphics Forum*, *29*(4), 1391–1398. https://doi.org/10.1111/J.1467-8659.2010.01735.X

Ghosh, A., Hawkins, T., Peers, P., Frederiksen, S., & Debevec, P. (2008). Practical modeling and acquisition of layered facial reflectance. *ACM Transactions on Graphics*, *27*(5). https://doi.org/10.1145/1409060.1409092

Glassner, A. S. (1984). Space subdivision for fast ray tracing. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *4*(10), 15–22. https://doi.org/10.1109/MCG.1984.6429331

Goral, C. M., Torrance, K. E., Greenberg, D. P., & Battaile, B. (1984). Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *18*(3), 213–222. https://doi.org/10.1145/800031.808601

Guarnera, D., Guarnera, G. C., Ghosh, A., Denk, C., & Glencross, M. (2016). BRDF representation and acquisition. *Computer Graphics Forum*, *35*(2), 625–650. https://doi.org/10.1111/cgf.12867

Haines, E. A., & Greenberg, D. P. (1986). The Light Buffer: A Shadow-Testing Accelerator. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *6*(9), 6–16. https://doi.org/10.1109/MCG.1986.276832

Hanrahan, P., & Krueger, W. (1993). Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1993*, 165–174. https://doi.org/10.1145/166117.166139

Hanrahan, P., Salzman, D., & Aupperle, L. (1991). A rapid hierarchical radiosity algorithm. *Proceedings of the 18th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1991*, *25*(4), 197–206. https://doi.org/10.1145/122718.122740

Hašan, M., Křivánek, J., Walter, B., & Bala, K. (2009). Virtual spherical lights for many-light rendering of glossy scenes. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *28*(5), 1–6. https://doi.org/10.1145/1661412.1618489

He, X. D., Torrance, K. E., Sillion, F. X., & Greenberg, D. P. (1991). A comprehensive physical model for light reflection. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *25*(4), 175–186. https://doi.org/10.1145/127719.122738

Herholz, S., Zhao, Y., Elek, O., Nowrouzezahrai, D., Lensch, H. P. A., & Křivánek, J. (2019). Volume path guiding based on zero-variance random walk theory. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *38*(3), 1–19. https://doi.org/10.1145/323063

Holzschuch, N. (2015). Accurate Computation of Single Scattering in Participating Media with Refractive Boundaries. *Computer Graphics Forum*, *34*(6), 48–59. https://doi.org/10.1111/CGF.12517

Howell, J. R., Mengüç, M. P., Daun, K., & Siegel, R. (2020). Thermal Radiation Heat Transfer. In *Thermal Radiation Heat Transfer* (7th Edition). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780429327308

Hu, W., Dong, Z., Ihrke, I., Grosch, T., Yuan, G., & Seidel, H. P. (2010). Interactive volume caustics in single-scattering media. *Proceedings of I3D 2010: The 2010 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, 109–117. https://doi.org/10.1145/1730804.1730822

Jakob, W., Arbree, A., Moon, J. T., Bala, K., & Marschner, S. (2010). A radiative transfer framework for rendering materials with anisotropic structure. *ACM SIGGRAPH 2010 Papers, SIGGRAPH 2010*. https://doi.org/10.1145/1778765.1778790

Jarosz, W., Zwicker, M., & Jensen, H. W. (2008). The beam radiance estimate for volumetric photon mapping. *Computer Graphics Forum*, *27*(2), 557–566. https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2008.01153.x

Jensen, H. W. (1995). Importance Driven Path Tracing using the Photon Map. *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '95*, 326–335. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-9430-0_31

Jensen, H. W. (1996). Global Illumination using Photon Maps. *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '96*, 21–30. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-7484-5_3

Jensen, H. W. (2001). Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping. In *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping* (1st Edition). A K Peters/CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780429294907

Jensen, H. W., & Christensen, P. H. (1998). Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps. *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1998*, 311–320. https://doi.org/10.1145/280814.280925

Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M., & Hanrahan, P. (2001). A practical model for subsurface light transport. *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 2001*, 511–518. https://doi.org/10.1145/383259.383319

Jimenez, J., Scully, T., Barbosa, N., Donner, C., Alvarez, X., Vieira, T., Matts, P., Orvalho, V., Gutierrez, D., & Weyrich, T. (2010). A practical appearance model for dynamic facial color. *ACM Transactions on Graphics*, *29*(6). https://doi.org/10.1145/1866158.1866167

Jönsson, D., Sundén, E., Ynnerman, A., & Ropinski, T. (2014). A Survey of Volumetric Illumination Techniques for Interactive Volume Rendering. *Computer Graphics Forum*, *33*(1), 27–51. https://doi.org/10.1111/CGF.12252

Kajiya, J. T. (1986). The rendering equation. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *20*(4), 143–150. https://doi.org/10.1145/15886.15902

Kajiya, J. T., & Von Herzen, B. P. (1984). Ray tracing volume densities. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *18*(3), 165–174. https://doi.org/10.1145/964965.808594

Kaplanyan, A., & Dachsbacher, C. (2010). Cascaded light propagation volumes for real-time indirect illumination. *Proceedings of I3D 2010: The 2010 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, 99–107. https://doi.org/10.1145/1730804.1730821

Keller, A. (1997). Instant radiosity. *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1997*, 49–56. https://doi.org/10.1145/258734.258769

Klimaszewski, K. S., & Sederberg, T. W. (1997). Faster Ray Tracing Using Adaptive Grids. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *17*(01), 42–51. https://doi.org/10.1109/38.576857

Křivánek, J., & Gautron, P. (2009). *Practical Global Illumination with Irradiance Caching*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-79540-4

Křivánek, J., Georgiev, I., Hachisuka, T., Vévoda, P., Ši, M., Nowrouzezahrai, D., & Jarosz, W. (2014). Unifying points, beams, and paths in volumetric light transport simulation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *33*(4), 1–13. https://doi.org/10.1145/2601097.2601219

Kurachi, Noriko., & Stark, M. M. . (2011). *The magic of computer graphics : landmarks in rendering* (1st Edition). A K Peters.

Kurt, M., Szirmay-Kalos, L., & Křivánek, J. (2010). An anisotropic BRDF model for fitting and Monte Carlo rendering. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *44*(1), 1–15. https://doi.org/10.1145/1722991.1722996

Lafortune, E. P. F., Foo, S.-C., Torrance, K. E., & Greenberg, D. P. (1997). Non-linear approximation of reflectance functions. *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1997*, 117–126. https://doi.org/10.1145/258734.258801

Lafortune, E. P., & Willems, Y. D. (1995). A 5D Tree to Reduce the Variance of Monte Carlo Ray Tracing. *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '95*, 11–20. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-9430-0_2

Lanier, Lee. (2018). *Aesthetic 3D lighting : history, theory, and application* (1st Edition). Routledge, Taylor & Francis Group.

Li, D., Sun, X., Ren, Z., Lin, S., Tong, Y., Guo, B., & Zhou, K. (2013). TransCut: Interactive Rendering of Translucent Cutouts. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *19*(03), 484–494. https://doi.org/10.1109/TVCG.2012.127

Löw, J., Kronander, J., Ynnerman, A., & Unger, J. (2012). BRDF models for accurate and efficient rendering of glossy surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, *31*(1). https://doi.org/10.1145/2077341.2077350

Matusik, W., Pfister, H., Brand, M., & McMillan, L. (2003). A data-driven reflectance model. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *22*(3), 759–769. https://doi.org/10.1145/882262.882343

Möller, T., & Trumbore, B. (2005). Fast, minimum storage ray/triangle intersection. *ACM SIGGRAPH 2005 Courses, SIGGRAPH 2005*. https://doi.org/10.1145/1198555.1198746

Neumann, L., Neumann, A., & Szirmay-Kalos, L. (1999). Compact Metallic Reflectance Models. *Computer Graphics Forum*, *18*(3), 161–172. https://doi.org/10.1111/1467-8659.00337

Nicodemus, F. E. (1965). Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface. *Applied Optics*, *4*(7), 767–775. https://doi.org/10.1364/AO.4.000767

Nicodemus, F. E., Richmond, J. C., Hsia, J. J., Ginsberg, I. W., & Limperis, T. (1977). Geometrical Considerations and Nonmenclature for Reflectance. *National Bureau of Standards Department of Commerce*. https://doi.org/10.6028/NBS.MONO.160

Novák, J., Georgiev, I., Hanika, J., & Jarosz, W. (2018). Monte Carlo methods for volumetric light transport simulation. *Computer Graphics Forum*, *37*(2), 551–576. https://doi.org/10.1111/cgf.13383

Novák, J., Nowrouzezahrai, D., Dachsbacher, C., & Jarosz, W. (2012). Virtual ray lights for rendering scenes with participating media. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *31*(4), 1–11. https://doi.org/10.1145/2185520.2185556

Oren, M., & Nayar, S. K. (1994). Generalization of Lambert's reflectance model. *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1994*, 239–246. https://doi.org/10.1145/192161.192213

Parker, S., Martin, W., Sloan, P. P. J., Shirley, P., Smits, B., & Hansen, C. (1999). Interactive ray tracing. *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics*, 119–126. https://doi.org/10.1145/300523.300537

Peers, P., Vom Berge, K., Matusik, W., Ramamoorthi, R., Lawrence, J., Rusinkiewicz, S., & Dutré, P. (2006). A compact factored representation of heterogeneous subsurface scattering. *ACM Transactions on Graphics*, *25*(3), 746–753. https://doi.org/10.1145/1141911.1141950

Pharr, M., Kolb, C., Gershbein, R., & Hanrahan, P. (1997). Rendering complex scenes with memory-coherent ray tracing. *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1997*, 101–108. https://doi.org/10.1145/258734.258791

Phong, B. T. (1975). Illumination for Computer Generated Pictures. *Communications of the ACM*, *18*(6), 311–317. https://doi.org/10.1145/360825.360839

Ritschel, T., Dachsbacher, C., Grosch, T., & Kautz, J. (2012). The State of the Art in Interactive Global Illumination. *Computer Graphics Forum*, *31*(1), 160–188. https://doi.org/10.1111/J.1467-8659.2012.02093.X

Romeiro, F., Vasilyev, Y., & Zickler, T. (2008). Passive reflectometry. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *5305 LNCS*(PART 4), 859–872. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88693-8_63

Rump, M., Müller, G., Sarlette, R., Koch, D., & Klein, R. (2008). Photo-realistic rendering of metallic car paint from image-based measurements. *Computer*

Graphics Forum, *27*(2), 527–536. https://doi.org/10.1111/J.1467-8659.2008.01150.X

Schlick, C. (1994). An Inexpensive BRDF Model for Physically-based Rendering. *Computer Graphics Forum*, *13*(3), 233–246. https://doi.org/10.1111/1467-8659.1330233

Shirley, P. (1992). Physically Based Lighting Calculations for Computer Graphics: A Modern Perspective. *Photorealism in Computer Graphics*, 73–83. https://doi.org/10.1007/978-3-662-09287-3_5

Sillion, F., & Puech, C. (1989). A general two-pass method integrating specular and diffuse reflection. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *23*(3), 335–344. https://doi.org/10.1145/74334.74368

Smits, B. E., Arvo, J., & Greenberg, D. (1994). A clustering algorithm for radiosity in complex environments. *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1994*, 435–442. https://doi.org/10.1145/192161.192277

Smits, B. E., Arvo, J. R., & Salesin, D. H. (1992). An importance-driven radiosity algorithm. *Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1992*, *26*, 273–282. https://doi.org/10.1145/133994.134080

Stam, J. (1995). Multiple scattering as a diffusion process. *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '95*, 41–50. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-9430-0_5

Sun, X., Zhou, K., Lin, S., & Guo, B. (2010). Line space gathering for single scattering in large scenes. *SIGGRAPH '10: ACM SIGGRAPH 2010 Papers*, 1–8. https://doi.org/10.1145/1833349.1778791

Tong, X., Wang, J., Lin, S., Guo, B., & Shum, H. Y. (2005). Modeling and rendering of quasi-homogeneous materials. *ACM Transactions on Graphics*, *24*(3), 1054–1061. https://doi.org/10.1145/1073204.1073311

Torrance, K. E., & Sparrow, E. M. (1967). Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces*. *JOSA*, *57*(9), 1105–1114. https://doi.org/10.1364/JOSA.57.001105

Veach, E., & Guibas, L. (1995a). Bidirectional Estimators for Light Transport. *Photorealistic Rendering Techniques*, 145–167. https://doi.org/10.1007/978-3-642-87825-1_11

Veach, E., & Guibas, L. J. (1995b). Optimally combining sampling techniques for Monte Carlo rendering. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*, 419–428. https://doi.org/10.1145/218380.218498

Veach, E., & Guibas, L. J. (1997). Metropolis light transport. *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1997*, 65–76. https://doi.org/10.1145/258734.258775

Wallace, J. R., Cohen, M. F., & Greenberg, D. P. (1987). A two-pass solution to the rendering equation: A synthesis of ray tracing and radiosity methods. *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1987*, *21*(4), 311–320. https://doi.org/10.1145/37401.37438

Wallace, J. R., Elmquist, K. A., & Haines, E. A. (1989). A Ray tracing algorithm for progressive radiosity. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *23*(3), 315–324. https://doi.org/10.1145/74334.74366

Walter, B., Arbree, A., Bala, K., & Greenberg, D. P. (2006). Multidimensional lightcuts. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *25*(3), 1081–1088. https://doi.org/10.1145/1141911.1141997

Walter, B., Fernandez, S., Arbree, A., Bala, K., Donikian, M., & Greenberg, D. P. (2005). Lightcuts: A scalable approach to illumination. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *24*(3), 1098–1107. https://doi.org/10.1145/1073204.1073318

Walter, B., Khungurn, P., & Bala, K. (2012). Bidirectional lightcuts. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *31*(4), 1–11. https://doi.org/10.1145/2185520.2185555

Walter, B., Marschner, S., Li, H., & Torrance, K. (2007). Microfacet models for refraction through rough surfaces. *EGSR'07: Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques*, 195–206.

Walter, B., Zhao, S., Holzschuch, N., & Bala, K. (2009). Single scattering in refractive media with triangle mesh boundaries. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, *28*(3), 1–8. https://doi.org/10.1145/1531326.1531398

Wang, B., & Holzschuch, N. (2018). Point-Based Rendering for Homogeneous Participating Media with Refractive Boundaries. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *24*(10), 2743–2757. https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2768525

Wang, J., Zhao, S., Tong, X., Lin, S., Lin, Z., Dong, Y., Guo, B., & Shum, H. Y. (2008). Modeling and rendering of heterogeneous translucent materials using the diffusion equation. *ACM Transactions on Graphics*, *27*(1). https://doi.org/10.1145/1330511.1330520

Wang, R., Cheslack-Postava, E., Luebke, D., Chen, Q., Hua, W., Peng, Q., & Bao, H. (2008). Real-time editing and relighting of homogeneous translucent materials. *Visual Computer*, *24*(7–9), 565–575. https://doi.org/10.1007/S00371-008-0237-9

Wang, R., Tran, J., & Luebke, D. (2005). All-frequency interactive relighting of translucent objects with single and multiple scattering. *ACM Transactions on Graphics*, *24*(3), 1202–1207. https://doi.org/10.1145/1073204.1073333

Wang, S. (2022). *Efficient Sample Usage in Photo-Realistic Rendering* [Universite Grenoble Alpes]. https://doi.org/10.34894/VQ1DJA

Wang, Y., Wang, J., Holzschuch, N., Subr, K., Yong, J. H., & Guo, B. (2010). Real-time Rendering of Heterogeneous Translucent Objects with Arbitrary Shapes. *Computer Graphics Forum*, *29*(2), 497–506. https://doi.org/10.1111/J.1467-8659.2009.01619.X

Ward, G. J. (1992). Measuring and modeling anisotropic reflection. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *26*(2), 265–272. https://doi.org/10.1145/142920.134078

Ward, G. J. (1994). Adaptive Shadow Testing for Ray Tracing. *Photorealistic Rendering in Computer Graphics*, 11–20. https://doi.org/10.1007/978-3-642-57963-9_2

Ward, G. J., Rubinstein, F. M., & Clear, R. D. (1988). Ray tracing solution for diffuse interreflection. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, *22*(4), 85–92. https://doi.org/10.1145/378456.378490

Whitted, T. (1980). An improved illumination model for shaded display. *Communications of the ACM*, *23*(6), 343–349. https://doi.org/10.1145/358876.358882

Xu, K., Gao, Y., Li, Y., Ju, T., & Hu, S. M. (2007). Real-time homogenous translucent material editing. *Computer Graphics Forum*, *26*(3), 545–552. https://doi.org/10.1111/J.1467-8659.2007.01077.X

Yan, L. Q., Zhou, Y., Xu, K., & Wang, R. (2012). Accurate Translucent Material Rendering under Spherical Gaussian Lights. *Computer Graphics Forum*, *31*(7), 2267–2276. https://doi.org/10.1111/J.1467-8659.2012.03220.X

Zhang, Y., Dong, Z., & Ma, K. L. (2013). Real-Time Volume Rendering in Dynamic Lighting Environments Using Precomputed Photon Mapping. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *19*(8), 1317–1330. https://doi.org/10.1109/TVCG.2013.17

Zhou, Y. (2023). An overview of BRDF models in computer graphics. *Theoretical and Natural Science*, *19*(1), 205–210. https://doi.org/10.54254/2753-8818/19/20230550

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Mucur, A., & Tong, T., "Küresel Aydınlatmada Sıvıların Emilim ve Saçılım Değerlerinin Fotogerçekçiliğe Etkileri," XVIII. Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu, 2024, ISBN: 978-975-6993-33-0

Makaleler

1. Mucur, A., & Tong, T., "Effects of Absorption and Scattering Values of Liquids on Global Illumination," *Megaron, 20*(2), 203-221. doi: 10.14744/megaron.2025.08684