



EGE ÜNİVERSİTESİ

DOKTORA TEZİ

**YARI SAYDAM MALZEMELERDE YÜZEY
ALTI SAÇILIMI İÇİN ETKİN BİR MODEL**

Murat KURT

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aydın ÖZTÜRK

Uluslararası Bilgisayar Anabilim Dalı

**Bilim Dalı Kodu : 619.02.04
Sunuş Tarihi : 24.01.2014**

E. Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Bornova-İZMİR

2014

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**YARI SAYDAM MALZEMELERDE YÜZEY
ALTI SAÇILIMI İÇİN ETKİN BİR MODEL**

Murat KURT

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aydın ÖZTÜRK

Uluslararası Bilgisayar Anabilim Dalı

**Bilim Dalı Kodu : 619.02.04
Sunuş Tarihi : 24.01.2014**

Bornova-İZMİR

2014

Murat KURT tarafından Doktora tezi olarak sunulan “Yarı Saydam Malzemelerde Yüzey Altı Saçılımı İçin Etkin Bir Model” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 24.01.2014 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	: Prof. Dr. Aydın ÖZTÜRK
Raportör Üye	: Yrd. Doç. Dr. Cengiz GÜNGÖR
Üye	: Doç. Dr. Yücel YEMEZ
Üye	: Doç. Dr. Adil ALPKOÇAK
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Korhan KARABULUT

ÖZET**YARI SAYDAM MALZEMELERDE YÜZEY
ALTI SAÇILIMI İÇİN ETKİN BİR MODEL**

KURT, Murat

Doktora Tezi, Uluslararası Bilgisayar Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aydın ÖZTÜRK

Ocak 2014, 122 sayfa

Bu tezde, yarı saydam malzemelerdeki yüzey altı saçılımı ışık transferi etkilerini sunmak için kullanılan yüzey altı saçılımı modelleri incelenmiştir. Bunun yanında, ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisini sunmak için yeni kompakt faktörizasyona dayalı yüzey altı saçılımı modelleri önerilmiştir.

Yarı saydam malzemelerdeki yüzey altı saçılımı etkileri çok boyutlu İki Yönlü Yüzey Saçılımı Yansıma Dağılım Fonksiyonu (Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function - BSSRDF) ile sunulmaktadır. Optik kalın malzemelerdeki çoklu saçılımın yayılma özelliğinden faydalanarak, sekiz boyutlu (8D) BSSRDF'ler dört boyutlu (4D) bir fonksiyona indirgenebilir. Ölçümlenmiş 4D BSSRDF verisini kompakt bir şekilde sunmak için ise, Tucker ve Tekil Değer Ayrıştırma (Singular Value Decomposition - SVD) gibi faktörizasyon tabanlı teknikler kullanılarak doğru yaklaşımlar elde edilmiştir. Geliştirilen yüzey altı saçılımı modelleri ile yüksek sıkıştırma oranlarında yüksek kalitede görüntüler elde edildiği gösterilmiştir.

Geliştirilen faktörizasyona dayalı yüzey altı saçılımı modellerinin performansının doğrulanması için heterojen yarı saydam malzemelere ait ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı veri setleri kullanılarak geniş kapsamlı bir çok karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar sözcükler: İki Yönlü Yüzey Saçılımı Yansıma Dağılım Fonksiyonu, BSSRDF, Yüzey Altı Saçılımı Modeli, Faktörizasyon, Heterojen Yüzey Altı Saçılımı.

ABSTRACT**AN EFFICIENT MODEL FOR SUBSURFACE SCATTERING
IN TRANSLUCENT MATERIALS**

KURT, Murat

Ph.D. in International Computer Department

Supervisor: Prof. Dr. Aydın ÖZTÜRK

January 2014, 122 pages

In this thesis, we review subsurface scattering models used for representing subsurface scattering light transport effects in translucent materials. In addition, we propose novel compact factored subsurface scattering representations for measured subsurface scattering data.

Subsurface scattering effects in translucent materials are represented by the multidimensional Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function (BSSRDF). By exploiting the diffusion property of multiple scattering in optically thick materials, these eight dimensional (8D) BSSRDF can be reduced to a four dimensional (4D) function. To compactly represent tabulated measured 4D BSSRDFs and achieve accurate approximations, we used factorization based techniques, such as Tucker and Singular Value Decomposition (SVD). We showed that the proposed factored subsurface scattering models provide high compression ratio while maintaining visual fidelity.

To validate the performance of the proposed factored subsurface scattering models, extensive comparisons are carried out using measured heterogeneous subsurface scattering data sets.

Keywords: Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function, BSSRDF, Subsurface Scattering Model, Factorization, Heterogeneous Subsurface Scattering.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince danışmanlığımı yapmış olan, deneyimleri, bilgileri ve önerileriyle araştırma ve geliştirmeyi yönlendirmesi ve sağladığı kaynaklarla destek olmasından ötürü sayın Prof. Dr. Aydın ÖZTÜRK'e (Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İzmir Üniversitesi, Türkiye) teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, tez izleme toplantılarında jüri olarak görev alan Doç. Dr. Yücel YEMEZ'e (Bilgisayar Mühendisliği, Koç Üniversitesi, Türkiye) ve Yrd. Doç. Dr. Cengiz GÜNGÖR'e (Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü, Ege Üniversitesi, Türkiye) değerli önerileri ve çalışmaya olan katkılarından ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sırasında bilgi ve görüşlerinden faydalandığım, gerektiğinde yardımlarını esirgemeyen ve ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verilerinin temininde ve görüntülenmesinde değerli katkıları bulunan sayın Yrd. Doç. Dr. Pieter PEERS'e (The College of William & Mary, USA), Doç. Dr. Diego GUTIERREZ'e (Universidad de Zaragoza, Spain), Dr. Xin TONG'a (Microsoft, USA) ve Dr. Yue DONG'a (Microsoft Research Asia, China) teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca başta oda arkadaşlarım Serkan ERGUN (Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü, Ege Üniversitesi, Türkiye), Özkan Anıl TÖRAL (Bilgisayar Mühendisliği, Yaşar Üniversitesi, Türkiye) ve Ahmet BİLGİLİ (Blue Brain Project, EPFL, Switzerland) olmak üzere, Ege Üniversitesi Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü'nde görevli değerli hocalarım, araştırma görevlisi arkadaşlarım ve idari personele ve bu uzun tez çalışması süresince her zaman yanımda olan aileme ve eşime de manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

“Yurtiçi Doktora Başarı Bursu Programı” ile doktora çalışmamı destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na (BİDEB) ve yine “Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı” ile doktora çalışmamı destekleyen TÜBİTAK'a (Proje No: 101E208, Yarı Saydam Malzemelerde Yüzey Altı Saçılımı için Etkin Bir Model) desteklerinden ötürü teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, bu tez çalışmasına yorumları, olumlu eleştirileri ve sağladıkları materyallerle katkıda bulunan, başta Greg WARD (Anywhere Software, USA), Prof. Dr. Mashhuda GLENCROSS (Loughborough University, UK), Dr. Jorge JIMENEZ (Activision Blizzard, USA) ve Dr. Nicolas BONNEEL (School of Engineering & Applied Sciences, Harvard University, USA) olmak üzere burada adını saymadığım yerli ve yabancı birçok bilim insanına teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxv
KISALTMALAR DİZİNİ	xxvii
1.GİRİŞ	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	6
2.1 BSSRDF'in Özellikleri	6
2.2 Yüzey Altı Saçılımı Modelleri	7
2.2.1 Analitik yüzey altı saçılımı modelleri	7
2.2.2 Veriye dayalı yüzey altı saçılımı modelleri	9
2.2.3 Çok katmanlı yüzey altı saçılımı modelleri	13
2.2.4 Fabrikasyon yüzey altı saçılımı modelleri	16
2.3 Yüzey Altı Saçılımı Hesaplanması Sırasında Kullanılan Uzaylar	17
2.3.1 Geometri-uzayı	17

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.3.2 Doku-uzayı	17
2.3.3 Ekran-uzayı	18
3. PARAMETRİZASYON VE TEST VERİLERİNİN OLUŞTURULMASI	19
3.1 Test Verilerinin Oluşturulması	19
3.2 Test Verilerinin Tahminleme İçin Hazırlanması	21
4. YÜZEY ALTI SAÇILIMININ TUCKER FAKTORİZASYONU İLE MODELLENMESİ	27
4.1 Tensörler Ve Tensör Ayırıştırma Yöntemleri	27
4.2 Tucker Yöntemi	29
4.2.1 ALS algoritması	30
4.3 Heterojen Yüzey Altı Saçılımı Verisinin Tucker Yöntemi İle Modellenmesi	32
4.3.1 Ön-işlem	33
4.3.2 Faktörizasyon	33
4.3.3 Lineer regresyon	36
4.3.4 Parametre analizi	37
5.YÜZEY ALTI SAÇILIMININ SVD YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ	39

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.1 SVD Yöntemi	39
5.2 Heterojen Yüzey Altı Saçılımı Verisinin SVD Yöntemi İle Modellenmesi	40
5.2.1 Faktörizasyon	40
5.2.2 Parametre analizi	43
6. GÖRÜNTÜLEME ALGORİTMASININ OLUŞTURULMASI	45
7. SONUÇLAR	49
7.1 Yüzey Altı Saçılımı Modellerinin Kıyaslanmasına Yönelik Sonuçlar	49
7.2 Tucker Faktörizasyonuna Dayalı Yüzey Altı Saçılımı Modeline Ait Sonuçlar	51
7.3 SVD Yöntemine Dayalı Yüzey Altı Saçılımı Modeline Ait Sonuçlar	57
8. ÖNERİLER	72
EK AÇIKLAMALAR-A	73
KAYNAKLAR DİZİNİ	77
ÖZGEÇMİŞ	85
EKLER	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Görüntüleme algoritmalarında kullanılan çeşitli yüzey altı saçılım modelleri ile sunulan yarı saydam malzemelerin örnek gösterimleri. Soldan sağa: kompozit heterojen mum malzemesi Peers et al.'ın (2006) faktörizasyon tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu ile modellenmiştir, portakal suyu Donner et al.'ın (2009) ampirik BSSRDF modeli ile sunulmuştur, insan cildi Jimenez et al.'ın (2010a) yüzey altı saçılımı modeli ile modellenip gerçek zamanlı olarak görüntülenmiştir, homojen üzüm malzemesi ise Munoz et al.'ın (2011) yüzey altı saçılımı modeli ile modellenmiştir (Peers et al., 2006; Donner et al., 2009; Jimenez et al., 2010a; Munoz et al., 2011).	2
1.2 Soldan sağa: Malzeme ile ışık etkileşimleri $x_i = x_o$ olduğu zaman bir BSDF, bir BTF veya bir SVBRDF ile modellenebilir. Burada BSDF, BRDF ile BTDF'in toplamına eşittir. $x_i \neq x_o$ olduğunda ise malzeme ile ışık etkileşimleri BSSRDF veya yüzey altı saçılımı modeli ile modellenebilir.	2
1.3 (a) Bir mermer büst tam Monte Carlo simülasyonu ile görüntülenmiştir (referans görüntü), (b) BRDF yaklaşımı, (c) Jensen et al.'ın (2001) BSSRDF modeli (Jensen et al., 2001).	3
1.4 (a) Bir kaymaktaşı domuz tam Monte Carlo simulasyonu ile görüntülenmiştir (referans görüntü), (b) Fuchs et al.'ın (2005) yüzey altı saçılımı modeli (Fuchs et al., 2005).	4
1.5 (a) Heterojen mum malzemesi kırmızı ve sarı mumdan oluşmaktadır ve bu yarı saydam malzeme Peers et al. (2006) tarafından ölçümlenmiştir. (b) Bu yarı saydam malzeme bir "diffuse albedo" ile sunulmak istendiğinde görüntüleme fiziksel olarak doğru olmayacaktır. (c) Diğer yandan, Peers et al.'ın (2006) faktörizasyona dayalı yüzey altı saçılımı modeli mum malzemesini iyi bir şekilde sunmaktadır (Peers et al., 2006).	4

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

- 2.1 İnsan cildi çeşitli yüzey altı saçılımı modelleri ile görüntülenebilir. Soldan sağa: Mertens et al.'ın (2005) ekran-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı modeli, Donner and Jensen'in (2005) geometri-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı modeli, d'Eon et al.'ın (2007) doku-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı modeli, ve Jimenez et al.'ın (2009) ekran-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı modeli. Mertens et al.'ın (2005) yüzey altı saçılımı modeli tek katmanlı iken, Donner and Jensen'in (2005), d'Eon et al.'ın (2007) ve Jimenez et al.'ın (2009) yüzey altı saçılımı modelleri çok katmanlıdır (Mertens et al., 2005; Donner and Jensen, 2005; d'Eon et al., 2007; Jimenez et al., 2009). 11
- 2.2 (a) Speküler yansıma katmanı, (b) Tekli saçılma katmanı, (c) Gölge saçılma katmanı, (d) Derin saçılma katmanı Ghosh et al.'ın (2008) yüzey altı saçılımı modelinde bir yüzün farklı bakış noktası ve ışıklandırma altındaki görüntülenmesi için kullanılmıştır. Sonuç "off-line" görüntü (e)'de görülebilir. (f) Referans fotoğrafıdır. Dudaklar ve göz kapaklarının "diffuse albedo"su referans fotoğrafa göre daha koyu olduğu için, Ghosh et al. (2008) "diffuse albedo"nun tahminlemesini tersine simülasyon kullanarak düzeltmiştir (Ghosh et al., 2008). 12
- 2.3 Jimenez et al. (2009) ekran-uzayı tabanlı gerçek zamanlı yüzey altı saçılımı görüntüleme algoritması objenin arkasından gelen ışığın iletimini doğru bir şekilde sunamamaktadır (soldaki resim). Diğer yandan, d'Eon et al. (2007) tarafından sunulan doku-uzayı tabanlı gerçek zamanlı görüntüleme algoritması bu etkiyi doğru bir şekilde vermektedir (ortadaki resim). Jimenez et al.'ın yüzey altı saçılımı sunumu spesifik kamera ve ışık pozisyonlarında belirli bölgelerde ufak harelerin oluşmasına neden olmaktadır; örneğin burundan göz kapaklarına düşen saçılmada olduğu gibi (sağdaki resim) (Jimenez et al., 2009). 12
- 2.4 Jimenez et al. (2012)'in yeni ayrılabilir yüzey altı saçılımı tekniği son olarak kullanılan doku-uzayı algoritmaları (d'Eon et al., 2007) ile kıyas-

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
lanabilir sonuçlar ortaya koymaktadır, ve bu durum bu metodu oyunlar için uygun kılmaktadır. Alttaki görüntü ise yazarlar tarafından sağlanan gerçek zamanlı “editing” ara yüzünü göstermektedir (Jimenez et al., 2012).	15
3.1 Peers et al.’ın (2006) üzerinde ölçümler yaptığı heterojen yarı saydam mermer satranç tahtası malzemesinin bir fotoğrafı.	20
3.2 Peers et al.’ın (2006) ölçümlendiği ham “diffuse” saçılma yansıma verisi $R_d(x_i, x_o)$. Bütün şekiller için $x_i = y_i = 0$ ’dır, ve satırlar x_o ’yu, sütunlar y_o ’yu göstermektedir. (a) Satranç tahtası (4×4) malzemesi, (b) Satranç tahtası (8×8) malzemesi, (c) Mermer (yakın çekim) malzemesi, (d) Yoğun damarlı mermer malzemesi.	20
3.3 R_d yüzey altı saçılımı matrisinin sunumu. (a) Işığı bloklayan bir damar içeren heterojen bir materyalin gösterimi. (b) Buna karşılık gelen R_d yüzey altı saçılımı matrisi. Dikkat edilirse ışığı bloklayan damar etkisini yatay ve dikey kesiklikler şeklinde göstermiştir. (c) R_d ’nin yeniden parametrize edilerek daha kompakt bir şekilde sunulmuş hali (Peers et al, 2006).	22
3.4 Ortalama tepkime $g(d)$ kullanılarak, $R_d(x_i, x_o)$ yüzey altı saçılımı matrisinin homojen kısmı olan $G(x_i, x_o)$ matrisi elde edilebilir (Peers et al., 2006).	22
3.5 Homojen kısmın yaklaşımı olan $G(x_i, x_o)$ matrisi $R_d(x_i, x_o)$ içindeki diyagonal yüzey altı saçılımı özelliklerini elimine etmek için kullanılabilir. Çizgili elemanlar sıfıra bölme sonucu oluşmuştur. Bu elemanların değerleri, sonuç matrisin faktörizasyon için daha uygun bir hale getirilecek şekilde anlamlı değerlerle doldurulmalıdır (Peers et al., 2006).	23
3.6 Satranç tahtası gibi birden çok yarı saydam malzemedan oluşan kompo-	

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
zit heterojen malzemelerde Peers et al. (2006) $g(d)$ matrislerini öbeikleme yolunu seçmişlerdir. Daha sonra her bir öbeğin ortalaması alınarak her bir öbek için $g(d)$ vektörlerini ayrı ayrı hesaplamışlar ve daha sonra bu $g(d)$ vektörlerinden $G(x_i, x_o)$ matrislerini hesaplamışlardır (Peers et al., 2006).	23
3.7 Song et al.'ın (2009) üzerinde ölçümler yaptığı heterojen yarı saydam malzemelerin fotoğrafları: (a) yapay taş, (b) mavi mum, (c) yeşim taşı, (d) sarı mum.	25
4.1 3 boyutlu bir tensör (Pajarola et al., 2013).	28
4.2 3 boyutlu X tensörünün Tucker yöntemi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen bileşenler. A, B ve C iki boyutlu matrisler, G, X ile aynı boyut sayısına sahip tensördür (Harshman, 1970).	28
4.3 3 boyutlu bir tensörde fiberler. (a) Mode-1 fiberler $x_{:jk}$ (b) Mode-2 fiberler $x_{i:k}$ (c) Mode-3 fiberler x_{ij} : (Pajarola et al., 2013).	32
4.4 (a)– (b) İlk olarak (a)'daki BSSRDF matrisi parametre değişimi ile yeniden biçimlendirilerek $R'_d(x_i, d)$ formuna getirilir. (b) – (c) Daha sonra, her bir satırdaki elemanlar her bir satırın ilk elemanı o satırın en büyük elemanı olacağı şekilde kaydırılarak yeniden dizilir. Bundan sonra ise, her satır o satırın en büyük elemanı ile bölünür. Bu işlemler sonucunda $R''_d(x_i, d)$ matrisi elde edilmektedir. $R''_d(x_i, d)$ 'den $R'_d(x_i, d)$ matrisini elde etmek için ise, sadece her satırdaki maksimum elemanın değeri ve karşılık gelen pozisyonunun saklanması gerekmektedir. .	35
4.5 Bilgili et al.'ın (2011) çalışmasında olduğu gibi, ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı matrisi $R''_d(x_i, d)$ 'yi sunmak için Tucker faktörizasyonu kullanılarak hata modelleme yöntemi uygulanmıştır.	35
4.6 (a) Değişen T değerlerine göre Tucker tabanlı modelin hata (RMSE) de-	

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
ğerleri; (b) değişen T değerlerine göre Tucker tabanlı modelin sıkıştırma oranları (compression ratio - CR); (c) Değişen P değerlerine göre Tucker tabanlı modelin hata (RMSE) değerleri; (d) değişen P değerlerine göre Tucker tabanlı modelin sıkıştırma oranları (CR). ..	37
5.1 2 boyutlu $M \times N$ boyutundaki A matrisinin SVD yöntemi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen bileşenler. Elde edilen matrisler $M \times N$ boyutunda U ve $N \times N$ boyutunda V iki boyutlu matrislerdir. Ayrıca bir de $N \times N$ boyutunda bir çekirdek tensörü elde edilir (Pajarola et al., 2013).	39
5.2 Bilgili et al.'ın (2011) çalışmasında olduğu gibi, ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı matrisi $R_d'''(x_i, d)$ 'yi sunmak için SVD faktörizasyonu kullanılarak hata modelleme yöntemi uygulanmıştır.	42
5.3 (a) Değişen S değerlerine göre SVD tabanlı modelin hata (RMSE) değerleri; (b) değişen S değerlerine göre SVD tabanlı modelin sıkıştırma oranları (compression ratio – CR).	43
6.1 MITSUBA görüntüleyicisi kullanılarak yüzey altı saçılımı etkileri BSSRDF modelleri kullanılarak simüle edilebilir. Burada Jensen and Buhler'in (2002) homojen yarı saydam malzemeler için önerdikleri analitik BSSRDF modeli kullanılmıştır (a) Mermer malzemesi, (b) Patates malzemesi.	46
6.2 MITSUBA görüntüleyicisi kullanılarak yüzey altı saçılımı etkileri hacimsel ışık transferi ile de simüle edilebilir. Burada eşarp objesi, Jakob et al. tarafından önerilen (2010) tam çoklu saçılma ve anizotropik saçılma modeli ile görüntülenmiştir.	46
6.3 Peers et al.'dan (2006) temin edilen ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisinin farklı objeler üzerinde ve noktasal ışıklandırma altında görüntülenmesi. (a) ve (c) ölçümlenmiş mermer satranç tahtası (4×4)	

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

- malzemesidir. (b) ve (d) ölçümlenmiş mermer satranç tahtası (8×8) malzemesidir. Monte Carlo yol gezinim algoritmasına dayanan bir algoritma ile görüntüler elde edilmiştir. 48
- 7.1 Tucker faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli farklı geometriler üzerinde kullanılabilir. Bu malzemelerde model parametreleri $T = 15$ ve $P = 4$ seçilmiştir. (a)-(c) mermer (yakın çekim) malzemesi, (b)-(d) yoğun damarlı mermer malzemesidir. ... 52
- 7.2 Spot ışıklandırma altında heykel objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen mermer satranç tahtası (8×8) verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Peers et al.'ın (2006) yüzey altı saçılımı modeli, (c) Tucker faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d), (e) ve (f) görüntülerde işaretlenen bölgelerin büyütülmüş hallerini göstermektedir. Her bir görüntünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 5$ ile ölçeklenmiştir. 53
- 7.3 Spot ışıklandırma altında ejderha objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen mermer satranç tahtası (4×4) verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Peers et al.'ın (2006) yüzey altı saçılımı modeli, (c) Tucker faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d), (e) ve (f) görüntülerde işaretlenen bölgelerin büyütülmüş hallerini göstermektedir. Her bir görüntünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 20$ ile ölçeklenmiştir. 54
- 7.4 Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Peers et al.'ın sunumu ile, Tucker tabanlı sunumun kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

- albedo” eşlemesi, Tucker tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 20$ ile ölçeklendirilmiştir. 55
- 7.5 Spot ışıklandırma altında kedi yavrusu, heykel ve ejderha objeleri kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen yapay taş verisi , (d) heterojen mavi mum verisi, (g) heterojen yeşim taşı verisi ve (j) heterojen sarı mum verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü). (b), (e), (h) ve (k) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntülerdir. (c), (f), (i) ve (m) SVD faktörizasyonu ile referans görüntü arasındaki fark görüntüleridir. Fark görüntüleri altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir. 58
- 7.6 Spot ışıklandırma altında kedi yavrusu, heykel ve ejderha objeleri kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen satranç tahtası (4×4) verisi , (d) heterojen satranç tahtası (8×8) verisi, (g) heterojen mermer (yakın çekim) verisi ve (j) heterojen yoğun damarlı mermer verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü). (b), (e), (h) ve (k) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntülerdir. (c), (f), (i) ve (m) SVD faktörizasyonu ile referans görüntü arasındaki fark görüntüleridir. Fark görüntüleri altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir. 59

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

- 7.7 Spot ışıklandırma altında ejderha objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen mavi mum verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Song et al.'ın (2009) yüzey altı saçılımı modeli, (c) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d) ve (e) referans görüntü ve model görüntüleri arasındaki fark görüntülerini göstermektedir. Her bir fark görüntüsünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir. 60
- 7.8 Spot ışıklandırma altında ejderha objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen yeşim taşı verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Song et al.'ın (2009) yüzey altı saçılımı modeli, (c) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d) ve (e) referans görüntü ve model görüntüleri arasındaki fark görüntülerini göstermektedir. Her bir fark görüntüsünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir. 61
- 7.9 Spot ışıklandırma altında heykel objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen sarı mum verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Song et al.'ın (2009) yüzey altı saçılımı modeli, (c) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d) ve (e) referans görüntü ve model görüntüleri arasındaki fark görüntülerini göstermektedir. Her bir fark görüntüsünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir. 62

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

- 7.10 Spot ışıklandırma altında kedi yavrusu objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen satranç tahtası (4×4) verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Song et al.'ın (2009) yüzey altı saçılımı modeli, (c) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d) ve (e) referans görüntü ve model görüntüleri arasındaki fark görüntülerini göstermektedir. Her bir fark görüntüsünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir. 63
- 7.11 Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Song et al.'ın sunumu (SubEdit) ile, SVD tabanlı sunumun mavi mum malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklendirilmiştir 64
- 7.12 Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Song et al.'ın sunumu (SubEdit) ile, SVD tabanlı sunumun yeşim taşı malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklendirilmiş-

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
tir.	66
7.13 Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Song et al.'ın sunumu (SubEdit) ile, SVD tabanlı sunumun sarı mum malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklendirilmiştir	67
7.14 Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Song et al.'ın sunumu (SubEdit) ile, SVD tabanlı sunumun satranç tahtası (4×4) malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklendirilmiştir	68
7.15 Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Peers et al.'ın sunumu ile, SVD tabanlı sunumun satranç tahtası (4×4) malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tah-	

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
min edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklendirilmiştir.	69
7.16 Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Peers et al.’ın sunumu ile, SVD tabanlı sunumun satranç tahtası (8×8) malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklendirilmiştir	70
7.17 SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin değişen S değerlerine göre görüntüleme zamanları. Zaman hesaplamaları Şekil 7.7’deki ejderha objesini içeren sahne üzerinde yapılmıştır.	71
A.1 (a) Bir adet parşömen kağıdı tam Monte Carlo foton gezinim algoritması ile görüntülenmiştir (referans görüntü). (b) Jensen et al.’ın (2001) BSSRDF modeli, (c) Donner and Jensen’in BSSRDF modeli (2005). (Donner and Jensen, 2005).	75
A.2 Xu et al.’ın (2007) yüzey altı saçılımı sunumu Jensen et al.’ın (2001) BSSRDF modelinde kullanılan saçılım katsayısı (σ_s), emilim katsayısı (σ_a) ve saçılım açısının ortalama kosinüsünün (g) gerçek zamanlı “editing”ine müsaade etmektedir. Pozitif $g > 0$ esas ileri saçılma anlamına gelirken, negatif $g < 0$ esas geriye saçılma anlamına gelmektedir (Xu et al., 2007).	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Bu tez raporu boyunca kullanılan notasyonlar ve anlamları.	3
2.1 İyi bilinen çeşitli yüzey altı saçılımı modellerine genel bir bakış. Bu tablo her yüzey altı saçılımı modelinin en önemli karakteristiklerini ve özelliklerini özetlemektedir.	16
2.2 Yarı saydam malzemeler üzerinde yapılan çeşitli ölçümlere genel bir bakış.	16
3.1 Peers et al.'ın (2006) ölçümlendiği heterojen yarı saydam malzemelerle ilgili detaylar.	20
3.2 Song et al.'ın (2009) ölçümlendiği heterojen yarı saydam malzemelerle ilgili detaylar.	25
7.1 İyi bilinen çeşitli yüzey altı saçılımı modellerinin kıyaslanması.	51
7.2 Tucker tabanlı modele ait tipik olarak seçilmiş model parametrelerine (T ve P) göre elde edilmiş bazı istatistikler.	52
7.3 Üst tablo saniyeler mertebesinde yüzey altı saçılımı sunumlarının ortalama “albedo” hesaplama zamanlarını göstermektedir. Alt tablo ise yüzey altı saçılımı sunumlarının bu hesaplama sırasındaki depolama gereksinimini MB cinsinden göstermektedir. Her iki tabloda da yüzey altı saçılımı modelleri aynı hata değerlerini (RMSE) verecek şekilde seçilmişlerdir.	56
7.4 SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeline ait tipik olarak seçilmiş model parametresine (S) ve optimizasyon sonucu elde edilen model parametrelerine (A ve B) göre elde edilmiş bazı istatistikler.	57
7.5 SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeline ait tipik olarak seçilmiş model parametresine (S) ve optimizasyon sonucu elde edilen model parametre-	

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)ÇizelgeSayfa

lerine (*A* ve *B*) göre elde edilmiş bazı istatistikler. Bu tablo ayrıca yaklaşık olarak aynı depolama gereksinimlerine göre SubEdit yöntemine ait bazı istatistiklerde sunmaktadır. 62

7.6 Çeşitli yüzey altı saçılımı sunumlarının Şekil 7.7'deki ejderha objesini içeren sahneyi görüntüleme zamanları. Bu tablo ayrıca aynı sahneyi görüntülerken yüzey altı saçılımı sunumlarının kullandıkları veri miktarlarını da göstermektedir. 65

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ALS	Alternating Least Squares (Alternatif En Küçük Kareler).
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function (İki Yönlü Yansıma Dağılım Foksiyonu).
BSDF	Bidirectional Scattering Distribution Function (İki Yönlü Saçılma Dağılım Foksiyonu).
BSSRDF	Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function (İki Yönlü Yüzey Saçılımı Yansıma Dağılım Foksiyonu).
BTDF	Bidirectional Transmittance Distribution Function (İki Yönlü İletkenlik Dağılım Foksiyonu).
BTF	Bidirectional Texture Function (İki Yönlü Doku Foksiyonu).
CR	Compression Ratio (Sıkıştırma Oranı).
GPU	Graphics Processing Unit (Grafik İşlem Birimi).
GUI	Graphical User Interface (Grafiksel Kullanıcı Arayüzü).
NMF	Non-negative Matrix Factorization (Negatif Olmayan Matris Faktörizasyonu).
PBRT	Physically-based Rendering Toolkit (Fisiksel Tabanlı Görüntüleme Aracı).
PCA	Principal Component Analysis (Temel Bileşenler Analizi).
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio (Pik Sinyal Gürültü Oranı).

KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
RMSE	Root-Mean-Square Error (Ortalama Karekök Hata).
RTE	Radiative Transfer Equation (Işınımsal Seyahat Eşitliği).
SSSS	Separable Subsurface Scattering (Ayrılabilir Yüzey Altı Saçılımı).
SVBRDF	Spatially-varying Bidirectional Reflectance Distribution Function (Uzaysal Değişen İki Yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu).
SVD	Singular Value Decomposition (Tekil Değer Ayırıştırma).

1. GİRİŞ

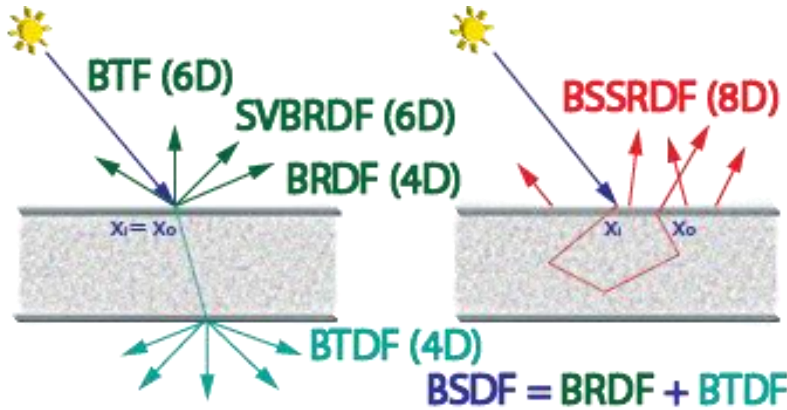
Görüntüleme (rendering) eşitliğini (Kajiya, 1986) doğru bir şekilde çözümlenmek sahnede bulunan malzemelerin görünümünün doğru ve ayrıntılı bir şekilde tanımlanmasını gerektirir. Bir objeyi görüntülerken uygun bir modelin seçimi, malzeme tipine ve onun kendine has fiziksel özelliklerine göre değişmektedir. Örneğin bir malzeme çok ince ise, veya opak ise, veya saf yalıtkan ise, bu durumda bu tip malzemeler İki Yönlü Saçılma Dağılım Foksiyonu (Bidirectional Scattering Distribution Function - BSDF) $f_s(\vec{\omega}_i; \vec{\omega}_o)$ ile modellenebilirler. Aslında BSDF, İki Yönlü Yansıma Dağılım Foksiyonu (Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF) $f_r(\vec{\omega}_i; \vec{\omega}_o)$ ile İki Yönlü İletkenlik Dağılım Fonksiyonunun (Bidirectional Transmittance Distribution Function - BTDF) $f_t(\vec{\omega}_i; \vec{\omega}_o)$ birleşiminden oluşmaktadır (Nicodemus et al., 1977). Bu tip malzemeler yüzeye ışığın değdiği noktadan ışığı yansıtıkları ve/veya ilettikleri için, BSDF 4 boyutlu (4D) bir fonksiyon olarak hesaba alınabilir.

Tebrik kartları, ahşap masalar, veya duvar kağıtları gibi bir çok objenin görünümü yüzeyin her bir noktasında değişen yansıma davranışı sergilemektedir. Böyle malzemeler Uzaysal Değişen İki Yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonları (Spatially-varying Bidirectional Reflectance Distribution Function - SVBRDF) $f_r(x, \vec{\omega}_i; \vec{\omega}_o)$ (burada $x = x_i = x_o$ 'dir) ile tipik bir BRDF'e göre daha iyi modellenirler. Hem SVBRDF hem de İki Yönlü Doku Fonksiyonu (Bidirectional Texture Function - BTF) (Dana et al., 1999; Tong et al., 2002) $f_t(x, \vec{\omega}_i; \vec{\omega}_o)$ aynı parametrisasyonlara sahip olsa da ve her ikisi de 6 boyutlu (6D) fonksiyonlar olsa da, BTF ile ayrıca gölgeleme, maskeleyme, ve yüzey altı saçılımı gibi lokal olmayan etkiler de sunulabilir (Weyrich et al., 2008) (Notasyonlar için Tablo 1.1'e bakınız).

Sunulmak istenen malzeme çok kalın olduğunda veya birden çok katman içerdiğinde ve ışık malzemenin yüzeyinin bir noktasından girdikten sonra malzemenin yüzeyinin başka bir noktasından ayrıldığında görüntüleme problemi özel dikkat ister. Mermer, insan cildi, mum, süt, kahve, portakal suyu, üzüm, sabun bu sınıf malzemeler grubundadır ve bu sınıf malzemelere yarı saydam malzemeler adı verilir (Bakınız Şekil 1.1). Genellikle, yarı saydam malzemelerin modellenmesi İki Yönlü Yüzey Saçılımı Yansıma Dağılım Fonksiyonu (BSSRDF) (Nicodemus et al., 1977) $S(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o)$ ile yapılır. Bununla beraber, bir çok araştırmacı (Fuchs et al., 2005; Peers et al., 2006; Ghosh et al., 2008)



Şekil 1.1. Görüntüleme algoritmalarında kullanılan çeşitli yüzey altı saçılımı modelleri ile sunulan yarı saydam malzemelerin örnek gösterimleri. Soldan sağa: kompozit heterojen mum malzemesi Peers et al.'ın (2006) faktörizasyon tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu ile modellenmiştir, portakal suyu Donner et al.'ın (2009) ampirik BSSRDF modeli ile sunulmuştur, insan cildi Jimenez et al.'ın (2010a) yüzey altı saçılımı modeli ile modellenip gerçek zamanlı olarak görüntülenmiştir, homojen üzüm malzemesi ise Munoz et al.'ın (2011) yüzey altı saçılımı modeli ile modellenmiştir (Peers et al., 2006; Donner et al., 2009; Jimenez et al., 2010a; Munoz et al., 2011).



Şekil 1.2. Soldan sağa: Malzeme ile ışık etkileşimleri $x_i = x_o$ olduğu zaman bir BSDF, bir BTF veya bir SVBRDF ile modellenebilir. Burada BSDF, BRDF ile BTDF'in toplamına eşittir. $x_i \neq x_o$ olduğunda ise malzeme ile ışık etkileşimleri BSSRDF veya yüzey altı saçılımı modeli ile modellenebilir.

BSSRDF'de bazı basitleştirmeler yaparak, yarı saydam malzemelerin yüzey altı saçılımı etkilerini modellemişlerdir. Bu bağlamda, yarı saydam malzemelerin yüzey altı saçılımı etkileri bir yüzey altı saçılımı modeliyle de sunulabilir.

Şekil 1.2'de görüldüğü üzere, BRDF $f_r(\vec{\omega}_i; \vec{\omega}_o)$, BSSRDF $S(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o)$ 'deki yüzey değişim parametresini $x_i = x_o$ olarak kabul eder, dolayısıyla BRDF, BSSRDF'in bir yaklaşımıdır (Jensen et al., 2001). BRDF ile yarı saydam bir malzemeyi modellemek istediğimizde, elde edilen görüntü görsel olarak doğru olmayacaktır (Bakınız Şekil 1.3 ve Şekil 1.5).

Yüzey altı saçılımını modellemek için birçok yüzey altı saçılımı modeli geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında, yüzey altı saçılımı modelleri geniş bir şekilde incelenmiştir, sınıflanıp kıyaslanmıştır. Dolayısıyla, bu tez çalışmasının uygulayıcı-



Şekil 1.3. (a) Bir mermer büst tam Monte Carlo simülasyonu ile görüntülenmiştir (referans görüntü), (b) BRDF yaklaşımı, (c) Jensen et al.’ın (2001) BSSRDF modeli (Jensen et al., 2001).

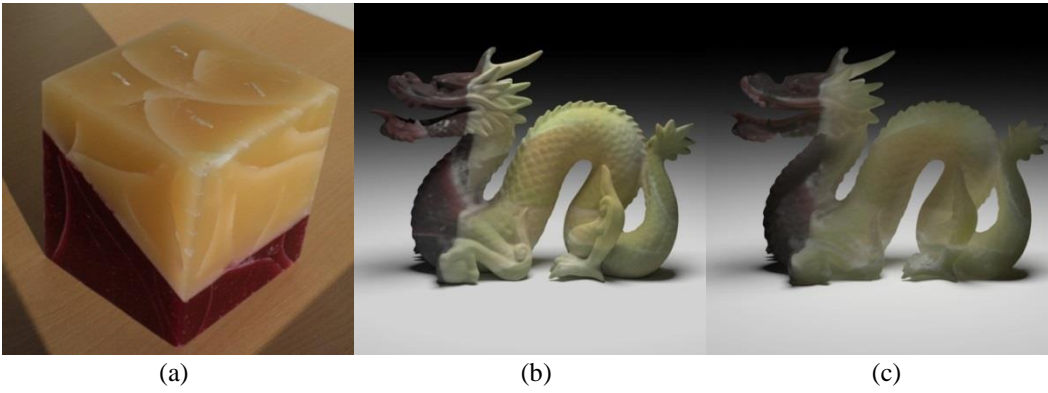
Tablo 1.1. Bu tez raporu boyunca kullanılan notasyonlar ve anlamları.

Sembol	Anlamı
$S(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o)$	BSSRDF
$S_d(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o)$	BSSRDF’in “diffusion” terimi
$S^{(1)}(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o)$	BSSRDF’in tekli saçılma terimi
$f_s(\vec{\omega}_i; \vec{\omega}_o)$	BPDF
$f_t(\vec{\omega}_i; \vec{\omega}_o)$	BTDF
$f_r(\vec{\omega}_i; \vec{\omega}_o)$	BRDF
$f_r(x, \vec{\omega}_i; \vec{\omega}_o)$	SVBRDF
$f_t(x, \vec{\omega}_i; \vec{\omega}_o)$	BTF
$F_t(x_i, \vec{\omega}_i)$	x_i ‘deki Fresnel iletimi
$F_t(x_o, \vec{\omega}_o)$	x_o ‘deki Fresnel iletimi
$F_i(\vec{\omega}_i)$	“Mesostucture” giriş fonksiyonu
$R_d(x_o, x_i)$	“Diffuse” yüzey altı yansımaları
$R(x_o, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o)$	Lokal yansımaları
$L_i(x_i, \vec{\omega}_i)$	Gelen radyans fonksiyonu
$L_o(x_o, \vec{\omega}_o)$	Giden radyans fonksiyonu
$\Phi_i(x_i, \vec{\omega}_i)$	Gelen “flux” fonksiyonu
$\vec{\omega}_i$	Birim gelen vektörü
$\vec{\omega}_o$	Birim giden vektörü
x_i	$\vec{\omega}_i$ ‘nin yüzey lokasyonu
x_o	$\vec{\omega}_o$ ‘nun yüzey lokasyonu
\vec{n}	Birim yüzey normal vektörü
$\Omega +$	Yüzeyin üzerindeki birim yarım küre
$G(x_o, x_i)$	Homojen yüzey altı yansımaları
$g(d)$	Ortalama tepki fonksiyonu
η	Işığın kırma gücünün indeksi
α	“Albedo”
σ_s	Saçılma katsayısı
σ_a	Emilim (Absorption) katsayısı
g	Saçılma açısının ortalama kosinüsü

cıların yüzey altı saçılımı modellerini kullanırken onlara bir yol gösterici hizmetinde bulunacağına inanmaktayız. Bu çalışma ayrıca yarı saydam malzeme-



Şekil 1.4. (a) Bir kaymaktaşı domuz tam Monte Carlo simülasyonu ile görüntülenmiştir (referans görüntü), (b) Fuchs et al.'in (2005) yüzey altı saçılımı modeli (Fuchs et al., 2005).



Şekil 1.5. (a) Heterojen mum malzemesi kırmızı ve sarı mumdan oluşmaktadır ve bu yarı saydam malzeme Peers et al. (2006) tarafından ölçümlenmiştir. (b) Bu yarı saydam malzeme bir “diffuse albedo” ile sunulmak istendiğinde görüntüleme fiziksel olarak doğru olmayacaktır. (c) Diğer yandan, Peers et al.'in (2006) faktörizasyona dayalı yüzey altı saçılımı modeli mum malzemesini iyi bir şekilde sunmaktadır (Peers et al., 2006).

lerin modellenmesindeki eğilimleri de vurgulamaktadır ve bunun diğer alanlar için de bir esinlenme kaynağı olacağı düşünülmektedir. Ek olarak, bu tez çalışmasının yarı saydam malzemeleri doğru bir şekilde tanımlama ve sunma konusunda da rehberlik edeceği düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında ayrıca, Bölüm 2’de bu konuda yapılan önceki çalışmalardan bahsedilmektedir. Bölüm 3’de parametrizasyon ve test verilerinin oluşturulmasına yönelik çalışmalardan bahsedilmektedir. Bölüm 4’de İngiltere’de düzenlenen “The 11th Theory and Practice of Computer Graphics (TPCG 2013)” konferansında da bir bildiri ile sunulan Tucker faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı sunumu anlatılmaktadır. Bölüm 5’de ise SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı sunumundan bahsedilmektedir. Bölüm 6’da, görüntüleme algoritmasının oluşturulmasına yönelik çalışmalar anlatılmaktadır. Bölüm 7’de ise

geliştirilen yüzey altı saçılımı modellerinin literatürde mevcut olan benzer yüzey altı saçılımı modellerine göre avantajları ve dezavantajları karşılaştırmalı çalışmalarla açıklanmaktadır. Bunun dışında yine aynı bölümde, literatürde mevcut olan belirli başlı yüzey altı saçılımı sunumularının birbirleriyle kıyaslanması bulunmaktadır. Bölüm 8’de ise öneriler ve geleceğe yönelik çalışmalardan bahsedilmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 BSSRDF'in Özellikleri

BSSRDF'in birimi $meter^{-2}steradian^{-1}$ 'dir (Nicodemus et al., 1977). BSSRDF aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir (Notasyonlar için Tablo 1.1'e bakınız):

$$S(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o) = \frac{dL_o(x_o, \vec{\omega}_o)}{d\Phi_i(x_i, \vec{\omega}_i)}. \quad (2.1)$$

BSSRDF, giden radyansın $L_o(x_o, \vec{\omega}_o)$ hesaplanması sırasında, gelen radyansın $L_i(x_i, \vec{\omega}_i)$ bütün gelen yönler ve alan A üzerinde integrali alınırken kullanılır:

$$L_o(x_o, \vec{\omega}_o) = \int_A \int_{\Omega^+} L_i(x_i, \vec{\omega}_i) S(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o) (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i dx_i. \quad (2.2)$$

BSSRDF $S()$ ile gösterilmektedir ve sekiz boyutlu (8D) bir fonksiyondur. $S(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o)$ 'nin argümanları arasındaki noktalı virgülün anlamı şudur; iki $(x, \vec{\omega})$ çifti, x_i ve x_o aynı kırılma indislerine sahip oldukları zaman BSSRDF'in değeri değişmeden birbirleriyle yer değiştirebilir. Bu özellik ayrıca karşılıklı olma (reciprocity) olarak bilinmektedir ve aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir:

$$S(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o) = S(x_o, \vec{\omega}_o; x_i, \vec{\omega}_i). \quad (2.3)$$

Fiziksel olarak doğru bir BSSRDF ayrıca enerjinin korunumu (energy conservation) ve negatif olmama (non-negativity) özelliklerine de sahip olmalıdır.

BSSRDF'in *negatif olmama* özelliğine göre BSSRDF $[0, \infty)$ arasında değerler almalıdır. *Enerjinin korunumu* özelliği ise aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir:

$$V(x_o, \vec{\omega}_o), \int_A \int_{\Omega^+} S(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o) (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i dx_i \leq 1. \quad (2.4)$$

Bir yüzey altı saçılımı modeli BSSRDF'in basitleştirilmiş bir hali olduğu için, fiziksel olarak doğru kabul edilebilecek bir yüzey altı saçılımı modeli de karşılıklı olma (reciprocity), enerjinin korunumu ve negatif olmama özelliklerine sahip olmalıdır.

Yarı saydam malzemeler malzeme tipine göre üç gruba ayrılmaktadırlar; homojen yarı saydam malzemeler, yarı-homojen yarı saydam malzemeler ve heterojen yarı saydam malzemeler. Şekil 1.1’de hem homojen hem heterojen yarı saydam malzemelerin örnekleri görülmektedir. Ekmek ve sünger gibi yarı-homojen yarı saydam malzemeler ise düzgün (uniform) dağılıma sahip heterojen yapılara sahiptirler (Tong et al., 2005). Weyrich et al. (2008) tarafından malzeme görünümü sunumlarının temel prensipleri iyi bir şekilde tanımlanmış olsa da, yüzey altı saçılımı modellerinin kıyaslanması, değerlendirilmesi ve guruplandırılması henüz yapılmamıştır.

2.2 Yüzey Altı Saçılımı Modelleri

Bu bölüm, yüzey altı saçılımı sunumlarını onların baskın özelliklerine göre sınıflayıp incelemektedir. Buna göre, Bölüm 2.2.1’de Analitik yüzey altı saçılımı modelleri, Bölüm 2.2.2’de Veriye dayalı (data-driven) yüzey altı saçılımı modelleri, Bölüm 2.2.3’de Çok katmanlı (multilayered) yüzey altı saçılımı modelleri, Bölüm 2.2.4’de ise Fabrikasyon (fabricated) yüzey altı saçılımı modelleri incelenmiştir. Örneğin, Bölüm 2.2.3’de hem analitik hem de veriye dayalı çok katmanlı yüzey altı saçılımı modelleri incelenmiştir. Çünkü, bu yüzey altı saçılımı modellerinin esas modelleme yöntemi çok katmanlı modellemedir.

2.2.1 Analitik yüzey altı saçılımı modelleri

Sekiz boyutlu (8D) BSSRDF Işınsal Seyahat Eşitliği (Radiative Transfer Equation - RTE) çözülerek doğru bir şekilde hesaplanabilir. RTE ayrıca Hacim Görüntüleme Eşitliği olarak da bilinmektedir. RTE bir integral eşitliğidir ve Monte Carlo simülasyonları, Sonlu Eleman Metodları veya Foton Eşleme (Photon Mapping) ile çözülebilir. Ancak bu metodlar oldukça yavaştır. Yayılma yaklaşımı (diffusion approximation) RTE için hızlı bir çözümdür ve Stam (1995) tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde, belirli şartlar altında, saçılmanın gelen ve giden yönler arasındaki bağımlılığını kaybettiği kabul edilmektedir ve çoklu saçılma buna göre hesaplanmaktadır (Notasyonlar için Tablo 1.1’e bakınız):

$$S_d(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} F_t(x_i, \vec{\omega}_i) R_d(x_i, x_o) F_t(x_o, \vec{\omega}_o). \quad (2.5)$$

Dolayısıyla, “diffuse” BSSRDF 4 boyutlu bir “diffuse” yüzey altı saçılımı yansıma fonksiyonu $R_d(x_i, x_o)$ ile tahminlenebilir ve bu durumda açısız bağımlı bileşenler yok farzedilmektedir ($F_t(x_o, \vec{\omega}_o)$ ve $F_t(x_i, \vec{\omega}_i)$). Gerçi Stam (1995),

yayılma yaklaşımı için numerik bir çözüm önerse de, yayılma yaklaşımı için bilinen en pratik çözüm Jensen et al. (2001) tarafından bilgisayar grafiklerine uygulanmıştır. Bu pratik çözüm iki kutuplu (dipole) yayılma yaklaşımı olarak bilinmektedir. İki kutuplu yayılma yaklaşımı genel olarak insan dokusu içinde lazer ışığının saçılımını modellemek için medikal fizikte kullanılsa da (Eason et al., 1978; Farrell et al., 1992), Ek Açıklamalar- A'dan da görüleceği üzere bir çok yüzey altı saçılımı fonksiyonu için ilham kaynağı olmuştur.

Yüzey altı saçılımı modelleri ile gerçek dünyadaki malzemeleri sunmak ölçümlenmiş veri ile mümkün olduğu için, Jensen et al. mermer ve insan cildi gibi bazı homojen yarı saydam malzemeleri ölçümlemişlerdir, ve bu malzemeleri kendi analitik BSSRDF modelleri ile sunmuşlardır. Jensen et al. model parametrelerinin değerlerini (σ'_s, σ_a ve η) ölçümlenmiş toplam “diffuse” yansıma $R = \int R_d dA$ verisinden tahminlemişlerdir ve bu değerleri kendi BSSRDF modellerinde kullanmışlardır. Şekil 1.3'den de görüleceği üzere, Jensen et al. BSSRDF modeli, klasik bir BRDF modeline göre homojen yarı saydam malzemeleri daha doğru bir şekilde sunmaktadır. Jensen et al.'ın iki kutuplu yayılma yaklaşımının ana dezavantajı ise heterojen yarı saydam malzemeleri görsel olarak doğru bir şekilde sunmak için uygun bir yöntem olmamasıdır.

Jensen et al.'ın (2001) iki kutuplu yayılma yaklaşımı ayrıca Jensen and Buhler (2002), Donner and Jensen (2005), Jakob et al. (2010) ve d'Eon and Irving (2011)'e de öncülük etmiştir. Onlar da $R_d(x_i, x_o)$ 'yi modellemek için bazı analitik fonksiyonlar önermişlerdir. Örneğin, Jensen and Buhler (2002) yarı saydam malzemelerde yüzey altı saçılımını hesaplamak için iki adımlı bir görüntüleme algoritması önermiştir. Bu yöntemde, ilk adım yüzey üzerindeki seçilen noktalarda parlamanın (irradiance) hesaplanmasına dayanmaktadır. İkinci adım ise, hızlı hiyerarşik integrasyon tekniğine dayanmaktadır ve iki kutuplu yayılma yaklaşımının parlama örneklerine dayanarak hesaplanmasından oluşmaktadır. Bu yöntem Jensen et al.'ın BSSRDF modelinden hızlı olsa da, her iki sunumda aynı yaklaşım doğruluğuna sahiptir. Jakob et al. (2010) ise izotropik iki kutuplu yayılma yaklaşımını anizotropik iki kutuplu yayılma yaklaşımı şeklinde genelleştirmiştir. Jakob et al. kendi uygulamalarını (implementations) basit tutmak istedikleri için, iki koordinat kullanmak yerine tek bir koordinat kullanmışlardır. Aslında anizotropinin doğru bir şekilde hesaplanması için her iki koordinatın da kullanılması gerekmektedir. Dolayısıyla, Jakob et al.'ın anizotropik iki kutuplu modeli görüntülenen objelerin kenarlarında görülebilir bozukluklara yol açmaktadır. Jensen et al.'ın izotropik BSSRDF modeli ile kıyaslandığında, Jakob

et al.'in anizotropik iki kutuplu yayılma yaklaşımı hem izotropik hem anizotropik yarı saydam malzemeleri sunabilmektedir. Daha fazla ayrıntı Ek Açıklamalar - A'da bulunabilir.

2.2.2 Veriye dayalı yüzey altı saçılımı modelleri

“Diffuse” yüzey altı yansıma fonksiyonu $R_d(x_i, x_o)$, yüzey altı saçılımı modellemesinin en önemli kısmı olduğu için bir çok yazar $R_d(x_i, x_o)$ 'yi etkin bir şekilde ölçümlemeye ve modellemeye odaklanmışlardır. Goesele et al. (2004) bazı heterojen yarı saydam malzemelerin “diffuse” yüzey altı yansıma fonksiyonu $R_d(x_i, x_o)$ 'yi DISCO ölçüm düzeneği ile ölçümlemişlerdir, 7×7 filtre çekirdeği kullanarak veri üzerinde interpolasyon yapmışlardır, ve veriyi direkt görüntüleme için uygun hale getirmişlerdir. Fuchs et al.'da (2005) heterojen yarı saydam malzemeler için bir model önermişlerdir ve DISCO düzeneği (Goesele et al., 2004) ile ölçümlenmiş hem izotropik hem anizotropik veri üzerinde kendi modellerini doğrulamışlardır. Diğer yandan Şekil 1.4'den de görüleceği üzere, Fuchs et al.'ın modeli heterojen yarı saydam malzemelerin çoklu saçılma davranışını modellerken yaklaşım kalitesinde ciddi bir kayba neden olmaktadır.

Tong et al. (2005), ekmek ve sünger gibi yarı-homojen yarı saydam malzemelere yönelmişlerdir ve bu tip malzemeleri modellemek için bir algoritma önermişlerdir. Diğer bir deyişle, Tong et al. (2005) yarı-homojen malzemeler için Eşitlik (2.2)'de tanımlanan giden radyansın hesaplanmasını yeniden düzenlemişlerdir. Buna göre Tong et al. $R(x_o, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o)$, $F_i(\vec{\omega}_i)$, $R_d(x_i, x_o)$ ve $F_t(x_o, \vec{\omega}_o)$ bileşenlerini malzeme üzerinden ölçümlemişlerdir ve kendi giden radyans hesaplamalarında kullanmışlardır. Bunun bir sonucu ise, Tong et al.'ın algoritmasının yalnızca yarı-homojen yarı saydam malzemeleri sunmak için uygun olmasıdır.

Mertens et al. (2005) ise insan cildinin gerçek zamanlı görüntülenmesine odaklanmışlardır. Mertens et al.'ın gerçek zamanlı yüzey altı saçılımı görüntüleme algoritmasına göre yayılma yaklaşımı ekran uzayında hesaplanmaktadır. Mertens et al.'ın metodu yüzey altı saçılımını hiyerarşik “radiosity”e benzer bir şekilde sınır eleman metodu gibi formüle eder ve önemine göre örnekleme (importance sampling) kullanır. Her bir örnek için, karşılık gelen parlamaya, tanjant uzayındaki önceden hesaplanan doku kaplamasından bakılır. Her bir piksel için, yüzeyin lokal integrasyonu tanjant uzayında hesaplanır. Mertens et al.'ın yüzey altı saçılımı sunumu tek katmanlı olduğu için ve heterojen

yarı saydam malzemeleri gösterim açısından uygun olmadığı için, insan cildini doğru bir şekilde gösterememektedir (Bakınız Şekil 2.1). Diğer yandan, ekran uzayı tabanlı bu sunum, doku uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı sunumlarından (d'Eon et al., 2007) daha hızlıdır.

Peers et al. (2006) da yine heterojen malzemelerin $R_d(x_i, x_o)$ kısmının ölçümlemesi ve modellenmesine odaklanmışlardır. İlk olarak, Peers et al. ölçümlemiş $R_d(x_i, x_o)$ verisinden homojen kısmı elde etmişlerdir. Daha sonra, geri kalan matrisi Negatif Olmayan Matris Ayırıştırma (NMF - Non-negative Matrix Factorization) yöntemiyle faktörize etmişlerdir. Peers et al. (2006) ayrıca satranç tahtası gibi birden çok malzemedен oluşan kompozit yarı saydam malzemelerin homojen kısmına ise *k-means* öbekleme algoritması uygulamışlardır. Peers et al.'ın sunumu kullanılarak görüntülenen böyle bir kompozit malzemenin görüntüsü Şekil 1.5'de görülmektedir. Sonuç olarak, Peers et al.'ın faktörizasyona dayalı yüzey altı saçılımı sunumu kabul edilebilir sıkıştırma oranlarında görsel doğruluk sağlamaktadır.

Bunun dışında, Wang et al. (2008) heterojen yarı saydam malzemelerin gerçek zamanlı görüntülenmesi ve "editing"ine izin veren bir algoritma önermişlerdir. Ek olarak, Wang et al. (2008) heterojen yarı saydam malzemelerin çoklu saçılma kısmını ölçümlemişlerdir, ve yayılma, emilim katsayıları gibi model parametrelerini bu ölçümlerden tahminlemişlerdir. Heterojen yarı saydam malzemeleri sunmak için Song et al. (2009) da bir yüzey altı saçılımı modeli önermişlerdir. İlk olarak, Song et al. Peers et al.'ın ölçümleme yöntemini uygulayarak "diffuse" BSSRDF verisini düz örnek malzemelerden ele geçirmişlerdir. Daha sonra, Song et al. ölçümledikleri yüzey altı saçılımı verilerini "editing"e müsaade edecek bir sunumla modellemişlerdir. Bunun bir sonucu olarak, Song et al.'ın yüzey altı saçılımı sunumu heterojen yarı saydam malzemelerin GPU (Graphics Processing Unit - GPU) tabanlı gerçek zamanlı görüntülenmesini ve gerçek zamanlı "editing"ini mümkün kılmaktadır. Peers et al.'ın faktörizasyona dayalı sunumu ile kıyaslandığında, Wang et al.'ın, ve Song et al.'ın yüzey altı saçılımı sunumu aynı sıkıştırma oranında daha az görsel doğruluk sağlamaktadır.

Donner et al. (2009) kandil mumu ve doymuş süt üzerinden yarı-sonlu homojen yüzey altı saçılımı için ölçümlemiş veri elde etmişlerdir. Donner et al. Monte Carlo yol gezinim algoritması kullanarak bu malzemeleri simüle etmişlerdir, ve altı boyutlu (6D) ampirik BSSRDF modellerini bu veri üzerinde

doğrulamışlardır. Donner et al.'ın BSSRDF modeli Jensen et al.'ın BSSRDF modelinden daha hassas olsa da, Jensen et al.'ın modeline göre daha çok depolama gerektirmektedir. Ek olarak, Donner et al.'ın BSSRDF modeli heterojen yarı saydam malzemeleri görsel olarak doğru bir şekilde gösterim için uygun değildir.

Munoz et al. (2011) ise izotropik homojen malzemelerin $R_d(x_i, x_o)$ kısmını ölçümleme ve modellenmesine odaklanmışlardır. Munoz et al. Eşitlik (2.2)'de gösterilen giden radyansın hesaplamasını yeniden formüle etmişlerdir:

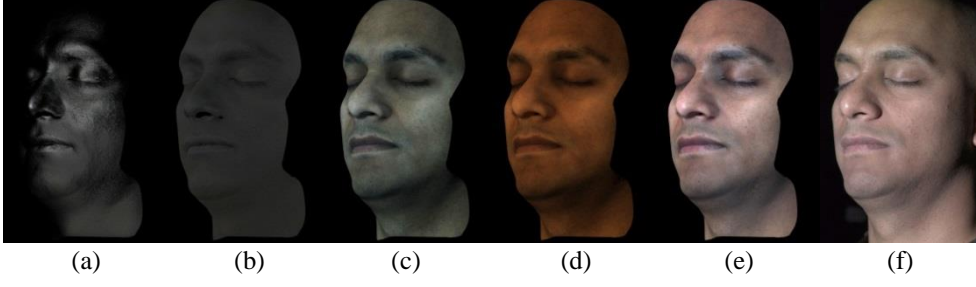
$$L(p_i, \vec{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \vec{\omega}_o) \sum_{j \in O} (R_d(r) E_j \Delta A + R_d(r_b) E_{b,j} \Delta A_b), \quad (2.5)$$

burada $L(p_i, \vec{\omega}_o)$ pikselin rengine karşılık gelmektedir. $\eta = 1.3$, $\Delta A = (\vec{\omega}_o \cdot \vec{n})^{-1}$ 'dir, r ve r_b ise üç boyutlu (3D) uzayda obje üzerindeki bazı noktalar kullanılarak hesaplanan Öklit mesafelerine karşılık gelmektedir (Munoz et al., 2011).

Munoz et al. temel fonksiyonların doğrusal bir kombinasyonu ile R_d 'yi tahminlemişlerdir, ve homojen yarı saydam malzemeden çekilen tek bir görüntü veya Jensen et al.'ın (2001) homojen BSSRDF modeli kullanılarak elde edilen tek bir görüntüyü tahminleme sırasında kullanmışlardır (Şekil 1.1'e bakınız). Bu anlamda, Munoz et al. üzüm, mum, turuncu sabun gibi bazı homojen yarı saydam malzemeleri ölçümlenmişlerdir ve kendi yüzey altı saçılımı modelleriyle modellemişlerdir. Önceki homojen yüzey altı saçılımı modelleri (Jensen et al.,



Şekil 2.1. İnsan cildi çeşitli yüzey altı saçılımı modelleri ile görüntülenebilir. Soldan sağa: Mertens et al.'ın (2005) ekran-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı modeli, Donner and Jensen'in (2005) geometri-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı modeli, d'Eon et al.'ın (2007) doku-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı modeli, ve Jimenez et al.'ın (2009) ekran-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı modeli. Mertens et al.'ın (2005) yüzey altı saçılımı modeli tek katmanlı iken, Donner and Jensen'in (2005), d'Eon et al.'ın (2007) ve Jimenez et al.'ın (2009) yüzey altı saçılımı modelleri çok katmanlıdır (Mertens et al., 2005; Donner and Jensen, 2005; d'Eon et al., 2007; Jimenez et al., 2009).



Şekil 2.2. (a) Speküler yansımaya katmanı, (b) Tekli saçılma katmanı, (c) Gölge saçılma katmanı, (d) Derin saçılma katmanı Ghosh et al.'ın (2008) yüzey altı saçılımı modelinde bir yüzün farklı bakış noktası ve ışıklandırma altındaki görüntülenmesi için kullanılmıştır. Sonuç "off-line" görüntü (e)'de görülebilir. (f) Referans fotoğrafıdır. Dudaklar ve göz kapaklarının "diffuse albedo"su referans fotoğrafa göre daha koyu olduğu için, Ghosh et al. (2008) "diffuse albedo"nun tahminlemesini tersine simülasyon kullanarak düzeltmiştir (Ghosh et al., 2008).



Şekil 2.3. Jimenez et al. (2009) ekran-uzayı tabanlı gerçek zamanlı yüzey altı saçılımı görüntüleme algoritması objenin arkasından gelen ışığın iletimini doğru bir şekilde sunamamaktadır (soldaki resim). Diğer yandan, d'Eon et al. (2007) tarafından sunulan doku-uzayı tabanlı gerçek zamanlı görüntüleme algoritması bu etkiyi doğru bir şekilde vermektedir (ortadaki resim). Jimenez et al.'ın yüzey altı saçılımı sunumu spesifik kamera ve ışık pozisyonlarında belirli bölgelerde ufak hataların oluşmasına neden olmaktadır; örneğin burundan göz kapaklarına düşen saçılmada olduğu gibi (sağdaki resim) (Jimenez et al., 2009).

2001; Jensen and Buhler, 2002) ile kıyaslandığında, Munoz et al.'ın yüzey altı saçılımı sunumu görsel doğruluk ve kolay kullanım arasında iyi bir denge sağlamaktadır. Ayrıca Munoz et al.'ın sunumu ölçümleme ve modelleme prosesini hızlandırmıştır. Çünkü, bu yöntem homojen yarı saydam malzemeleri modellemek için tek bir görüntüye ihtiyaç duymaktadır. Bu metodun en önemli dezavantajı ise heterojen yarı saydam malzemelerin görsel olarak tatmin edici bir şekilde gösterimi için uygun olmamasıdır.

2.2.3 Çok katmanlı yüzey altı saçılımı modelleri

İnsan cildi gibi bazı yarı saydam malzemeler epidermis ve dermis gibi birden çok katmandan oluşmaktadır. Bu sınıfa ait yarı saydam malzemeleri doğru bir şekilde modellemek için çeşitli çok katmanlı yüzey altı saçılımı modelleri (Borshukov and Lewis, 2003; Donner and Jensen, 2005; Donner and Jensen, 2006; d'Eon et al., 2007; Donner et al., 2008; Ghosh et al., 2008; Jimenez et al., 2009; Jimenez et al., 2010a; Jimenez et al., 2010b; d'Eon and Irving, 2011; Jimenez et al., 2012) önerilmiştir. Şekil 2.1'den de görüleceği üzere, çok katmanlı yüzey altı saçılımı modelleri (Donner and Jensen, 2005; d'Eon et al., 2007; Jimenez et al., 2009) insan cildini tek katmanlı yüzey altı saçılımı modellerine göre (Mertens et al., 2005) daha iyi bir görsel doğrulukla sunmaktadırlar. Örneğin, Donner and Jensen (2005) iki kutuplu yayılma yaklaşımını (Jensen et al., 2001) çok kutuplu yayılma yaklaşımı şeklinde genelleştirerek çok katmanlı yarı saydam malzemeleri sunmuşlardır. Jensen et al.'ın BSSRDF modeli ile kıyaslandığında, bu sunum daha çok depolama gerektirmektedir. Diğer yandan, bu sunum çok katmanlı yarı saydam malzemeleri sunmak için Jensen et al.'ın BSSRDF modeline göre daha uygundur. d'Eon and Irving (2011) iki kutuplu ve/veya çok kutuplu yayılma yaklaşım teorisini sayısallaştırılmış (quantized) yayılma teorisi şeklinde genelleştirmişlerdir. Bu sırada, Green'in yayılma fonksiyonunu sayısallaştırarak bu işlemi gerçekleştirmişlerdir. Jensen et al.'ın BSSRDF modeli, ve Donner and Jensen'in BSSRDF modeli ile kıyaslandığında, d'Eon and Irving'in yüzey altı saçılımı modeli özellikle yüksek frekanslı ışıklandırma altında daha hassas bir sunumdur, kolaylıkla gerçek zamanlı metodlara ölçeklenebilir ve tam bir doğruluk için daha çok depolama gerektirmektedir. Daha fazla ayrıntı Ek Açıklamalar - A'da bulunmaktadır.

Bunun dışında, Ghosh et al.'ın (2008) yüzey altı saçılımı sunumu 4 katman içermektedir (Bakınız Şekil 2.2). Ghosh et al. görüntüleme fazında bütün bu katmanları birleştirmişlerdir, ve aynı modelleme prosedürünü yüzeydeki farklı bölgeler için uygulamışlardır. Dolayısıyla, Ghosh et al.'ın yüzey altı saçılımı sunumu eklemeli bir yöntemdir ve bu durum diğer yüzey altı saçılımı sunumlarıyla kıyaslandığında önemli bir ayrımdır. Bunun dışında, Donner et al. (2008), ve Jimenez et al. (2010a) da insan cildi malzemesini ölçümlemişlerdir, ve çok katmanlı yüzey altı saçılımı sunumlarıyla sunmuşlardır. Donner et al.'ın yüzey altı saçılımı sunumunun önemli bir avantajı heterojen bir yüzey altı saçılımı sunumu olmasıdır. Dolayısıyla, deri pigmentasyonundaki kompleks değişimler Donner et al.'ın modeli ile doğru bir şekilde gösterilebilmektedir. Ghosh et al.'ın

lokal-homojen, ve Donner et al.'ın heterojen yüzey altı saçılımı modelleri ile kıyaslandığında, Jimenez et al.'ın homojen yüzey altı saçılımı sunumu gerçek zamanlı görüntüleme için daha uygundur. Şekil 1.1'den de görüleceği üzere, Jimenez et al.'ın modeli ile bir çok duygusal durum da görsel olarak doğru bir şekilde gösterilebilmektedir. Ancak, Ghosh et al.'ın, ve Donner et al.'ın yüzey altı saçılımı sunumları Jimenez et al.'ın yüzey altı saçılımı sunumlarına göre daha çok görsel doğruluk sağlamaktadırlar. Çünkü bu yöntemler doku-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı sunumları iken Jimenez et al.'ın yüzey altı saçılımı sunumu ekran-uzayı tabanlı bir yüzey altı saçılımı sunumudur.

Diğer yandan, d'Eon et al. (2007), ve Jimenez et al.'ın (Jimenez et al., 2009; Jimenez et al., 2010a; Jimenez et al., 2010b; Jimenez et al., 2012) çok katmanlı yüzey altı saçılımı sunumları insan cildinin gerçek zamanlı görüntülenmesine müsaade etmektedir (Şekil 1.1, Şekil 2.1, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'e bakınız). d'Eon et al.'ın (2007) gerçek zamanlı yüzey altı saçılımı görüntüleme algoritması yayılma yaklaşımını doku uzayında gerçekleştirirken, Jimenez et al.'ın (Jimenez et al., 2009; Jimenez et al., 2012) gerçek zamanlı yüzey altı saçılımı görüntüleme algoritması aynı yayılma yaklaşımını ekran-uzayında gerçekleştirmektedir. Dolayısıyla, Jimenez et al.'ın (Jimenez et al., 2009; Jimenez et al., 2012) metodları, d'Eon et al.'ın (2007) metodundan daha hızlıdır ve neredeyse bütün metodlar aynı görsel doğrulukta görüntüler üretmektedirler. d'Eon et al.'ın (2007) doku-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu yayılma yüzey altı yansıma fonksiyonunu Gaussian'ların bir toplamı ile hesaplamaya dayanmaktadır, ve daha sonra bu profil iki kutuplu veya çok kutuplu BSSRDF'e (Jensen et al., 2001) uydurulur. Bu sunumda, ilk olarak gelen ışık örneklenir ve daha sonra iki kutuplu veya çok kutuplu BSSRDF Gaussian'ların bir toplamı ile sunulur. Son olarak, gelen ışık ve iki kutuplu veya çok kutuplu BSSRDF birleştirilerek son görüntü elde edilir. Diğer yandan, Jimenez et al.'ın (Jimenez et al., 2009; Jimenez et al., 2012) metodları ayrılabilir yüzey altı saçılımı (Separable Subsurface Scattering - SSSS) yöntemine dayanmaktadır. Modern GPU'ların çoklu görüntüleme yeteneklerinden faydalanmak için, Jimenez et al. (2009) "diffuse", "specular", mat ve derinlik bileşenlerini ayrı ayrı depolamışlardır. Daha sonra, bu bileşenleri ışıklandırmanın yayılma bileşeninin yüzey altı saçılımı etkilerini vermek için kullanmışlardır. Şekil 2.3'den de görüleceği üzere, Jimenez et al.'ın ekran uzayı tabanlı metodunun kalitesi, d'Eon et al.'ın (2007) doku uzayı tabanlı metodu ile aynı görsel doğrulukta değildir. Aslında, bütün ekran uzayı teknikleri (Jimenez et al., 2009; Jimenez et al., 2012) tam olarak bir BSSRDF'i tanımlamamaktadırlar,



Şekil 2.4. Jimenez et al. (2012)'ın yeni ayrılabilir yüzey altı saçılımı tekniği son olarak kullanılan doku-uzayı algoritmaları (d'Eon et al., 2007) ile kıyaslanabilir sonuçlar ortaya koymaktadır, ve bu durum bu metodu oyunlar için uygun kılmaktadır. Altındaki görüntü ise yazarlar tarafından sağlanan gerçek zamanlı “editing” ara yüzünü göstermektedir (Jimenez et al., 2012).

yalnızca yüzey altı saçılımı etkilerini simüle etmektedirler. Şekil 2.4'den de görüleceği üzere, Jimenez et al.'ın (2012) SSSS tekniği yüzey altı saçılımı hesaplamalarını yalnızca iki adımda gerçek zamanlı olarak gerçekleştirmektedirler, ve insan cildinin gerçek zamanlı “editing”ine izin vermektedir. İnsan cildinin görünümü üzerine bir inceleme Igarashi et al. (2007)'ın çalışmasında bulunmaktadır.

Tablo 2.1. İyi bilinen çeşitli yüzey altı saçılımı modellerine genel bir bakış. Bu tablo her yüzey altı saçılımı modelinin en önemli karakteristiklerini ve özelliklerini özetlemektedir.

Yüzey Altı Saçılımı Sunumu	Izo. / Anizo.	Analitik/Veriye Dayalı	Malzeme Tipi	Katmanlı	Uzay
Jensen et al. (2001)	izotropik	analitik	homojen	hayır	geometri-uzayı
Jensen and Buhler (2002)	izotropik	analitik	homojen	hayır	geometri-uzayı
Borshukov and Lewis (2003)	izotropik	veriye dayalı	homojen	evet	doku-uzayı
Fusch et al. (2005)	izotropik	veriye dayalı	heterojen	hayır	doku-uzayı
Donner and Jensen (2005)	izotropik	analitik	homojen	evet	geometri-uzayı
Wang et al. (2005)	izotropik	veriye dayalı	homojen	hayır	doku-uzayı
Mertens et al. (2005)	izotropik	veriye dayalı	homojen	hayır	ekran-uzayı
Peers et al. (2006)	izotropik	veriye dayalı	heterojen	hayır	doku-uzayı
d'Eon et al. (2007)	izotropik	veriye dayalı	homojen	evet	doku-uzayı
Xu et al. (2007)	izotropik	veriye dayalı	homojen	hayır	geometri-uzayı
Donner et al. (2008)	izotropik	veriye dayalı	heterojen	evet	doku-uzayı
Wang et al. (2008)	izotropik	veriye dayalı	heterojen	hayır	geometri-uzayı
Ghosh et al. (2008)	izotropik	veriye dayalı	lokal-homojen	evet	doku-uzayı
Donner et al. (2009)	izotropik	veriye dayalı	homojen	hayır	geometri-uzayı
Song et al. (2009)	izotropik	veriye dayalı	heterojen	hayır	doku-uzayı
Jakob et al. (2010)	anizotropik	analitik	homojen	hayır	geometri-uzayı
d'Eon and Irving (2011)	izotropik	analitik	homojen	evet	geometri-uzayı
Munoz et al. (2011)	izotropik	veriye dayalı	homojen	hayır	geometri-uzayı
Jimenez et al. (2009; 2010a; 2010b; 2012)	izotropik	veriye dayalı	homojen	evet	ekran-uzayı

Tablo 2.2. Yarı saydam malzemeler üzerinde yapılan çeşitli ölçümlere genel bir bakış.

Yüzey Altı Saçılımı Ölç.	Ölçülen Bileşen	Malzeme Tipi	Katmanlı	Ölçülen Malzemeler
Jensen et al. (2001)	$R = \int R_d(x_i, x_o) dA$	homojen	hayır	Mermer, insan cildi, süt, vs.
Borshukov and Lewis (2003)	dijital görüntüler	lokal-homojen	evet	İnsan cildi
Goesele et al. (2004)	$R_d(x_i, x_o)$	heterojen	hayır	Mermer at, stari, ördek
Tong et al. (2005)	$R_d(x_i, x_o), R(x_o, \bar{\omega}_i, \bar{\omega}_o), \dots$	yarı-homojen	hayır	Ekmek, sünger, vs.
Narasimhan et al. (2006)	Saçılma özellikleri	homojen	hayır	Suda çözünebilir malzemeler
Peers et al. (2006)	$R_d(x_i, x_o)$	heterojen	hayır	Satranç tahtası, mum, vs.
Donner et al. (2008)	çoklu-spektral görüntüler	heterojen	evet	İnsan cildi
Ghosh et al. (2008)	dijital görüntüler	lokal-homojen	evet	İnsan cildi
Wang et al. (2008)	çoklu saçılma kısmı	heterojen	hayır	Mum, mermer, yapay taş
Donner et al. (2009)	giden ışığın dağılımı	homojen	hayır	Mum, seyreltilmiş süt
Song et al. (2009)	$R_d(x_i, x_o)$	heterojen	hayır	Satranç tahtası, mum, yeşimtaşı,...
Jimenez et al. (2010a)	tek bir görüntü	homojen	evet	İnsan cildi
Munoz et al. (2011)	tek bir görüntü	homojen	hayır	Üzüm, sabun, mum, vs.

2.2.4 Fabrikasyon yüzey altı saçılımı sunumları

Haşan et al. (2010) ve ayrıca Dong et al. (2010) hem homojen hem heterojen yarı saydam malzemeleri modellemek ve üretmek için bazı prosesler önermişlerdir. Haşan et al.'ın yöntemi üç boyutlu (3D) yazıcılar için uygunken, Dong et al.'ın yöntemi hem fireze makineleri hem de 3D yazıcılar için uygundur. Bu tez çalışmasında, amacımız sadece görüntüleme (rendering) algoritmaları için

önerilen yüzey altı saçılımı modellerini incelemek olduğu için bu sunumlar detaylı bir şekilde incelememiştir.

Çeşitli yüzey altı saçılımı modellerinin genel bir değerlendirmesi Tablo 2.1'de sunulmuştur. Burada, her bir yüzey altı saçılımı sunumunun belirli başlı özellikleri (izotropik, anizotropik, analitik, veriye dayalı, homojen, heterojen, v.s.) listelenerek yüzey altı saçılımı sunumlarının genel bir kıyaslanması sağlanmıştır. Ayrıca, yarı saydam malzemeler üzerinden yapılan yüzey altı saçılımı ölçümlerinin bazı özellikleri Tablo 2.2'de özetlenmiştir. Uygun olan yüzey altı saçılımı modelinin seçimi malzeme tipi, depolama gereksinimleri, yaklaşım doğruluğu, ve görüntüleme zamanları gibi çeşitli kriterlere göre değişmektedir. Analitik yüzey altı saçılımı modelleri, veriye dayalı yüzey altı saçılımı modellerine göre daha az depolama gerektirirler, gerçek zamanlı görüntüleme için uygundur ve belirli özel durumlar altında geçerlidirler.

2.3 Yüzey Altı Saçılımı Hesaplanması Sırasında Kullanılan Uzaylar

Bu bölümde yarı saydam malzemelerde yüzey altı saçılımını hesaplarken kullanılan uzaylar özetlenmiştir. Buna göre, Bölüm 2.3.1'de Geometri-uzayı, Bölüm 2.3.2'de Doku-uzayı, Bölüm 2.3.3'de Ekran-uzayı'ndan bahsedilmektedir.

2.3.1 Geometri-uzayı

Bu tip hesaplamada, yüzey altı saçılımı sunumları (Jensen et al., 2001; Jensen and Buhler, 2002; Donner and Jensen, 2005; d'Eon and Irving, 2011) geometriyi direkt olarak Monte Carlo teknikleri kullanarak örnekler ve geometrinin parametrisasyonuna gerek yoktur. Bu durum, doku-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı sunumlarına göre önemli bir avantajdır. Çünkü doku-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı sunumları geometrinin bir boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) veya üç boyutlu (3D) parametrisasyonunu gerektirirler.

2.3.2 Doku-uzayı

Doku-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı sunumlarında (d'Eon et al., 2007; Peers et al., 2006; Song et al., 2009), malzeme bilgisi dokularda saklanmaktadır. Dolayısıyla, doku-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı modelini bir objeye uygulamak için, 1D, 2D veya 3D doku eşlemesinin kullanılması gerekmektedir. Doku-uzayı

tabanlı metodlar, ekran-uzayı tabanlı metodlara göre bazı dezavantajlara sahiptir. Örneğin, parlama eşleminin görüntü içindeki her obje için ayrı ayrı hesaplanması gerekir. Doku-uzayı tabanlı metodlar ayrıca kameraya görünür olsa da olmasa da bütün yüzeyleri örneklerler. Bunun dışında, doku-uzayı tabanlı metodlar mevcut GPU'ların "frame buffer"ları gibi kaynaklarından faydalanmazlar ve bu durumda doku-uzayı tabanlı metodları ekran-uzayı tabanlı metodlara göre daha yavaş kılmaktadır.

2.3.3 Ekran-uzayı

Ekran-uzayında yüzey altı saçılımı sunumları (Mertens et al., 2005; Jimenez et al., 2009; Jimenez et al., 2010a; Jimenez et al., 2010b; Jimenez et al., 2012), iki kutuplu BSSRDF'i (Jensen et al., 2001) hesaplarken şu anki GPU'ların kaynaklarından tam olarak yararlanırlar. Ekran-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı sunumlarında, GPU'ların derin bir "frame buffer"ı kullanılır. "Frame buffer" pozisyon, normal ve malzeme bilgisi gibi her piksel için gerekli olan bütün bilgiyi içermektedir. Bu sayede, orjinal poligonal geometrideki poligon adedine bakılmaksızın bir piksel etrafındaki geometrinin kaba bir şekilde yeniden oluşturulabilmesi sağlanmaktadır. Dolayısıyla, bu tip hesaplamada sahnedeki her bir obje için parlaklık eşleminin hesaplanmasına gerek yoktur. Ekran-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı sunumlarında, "backface culling" ve "viewport clipping" gibi bazı GPU optimizasyonları kendiliğinden olmaktadır. Bu optimizasyonlar ekran-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı sunumlarını doku-uzayı tabanlı ve geometri-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı sunumlarına göre daha hızlı yapmaktadır.

Ekran-uzayı tabanlı yüzey altı saçılımı sunumlarının en önemli dezavantajı ise parlak malzemeler veya yüksek frekanslı ışıklandırma kullanıldığında ışıklandırmadaki ufak detaylar doğru bir şekilde gösterilememektedir. Diğer bir deyişle, BSSRDF'in hesaplanışında kullanılması gereken ve görünür olmayan önemli parlaklık bilgisi kullanılmamaktadır. Bu durumda, siluet kenarlardaki ışık gölgelendirmesinin kaybolmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, Şekil 2.3'den de görüleceği üzere, ekran-uzayı tabanlı metodların görsel kalitesi doku-uzayı tabanlı metodlara göre daha düşük olmaktadır.

3. PARAMETRİZASYON VE TEST VERİLERİNİN OLUŞTURULMASI

3.1 Test Verilerinin Oluşturulması

Peers et al. (2006) mermer, mermerden yapılmış satranç tahtası (Şekil 3.1'e bakınız) gibi heterojen yarı saydam malzemelerden bazılarını görüntü tabanlı bir teknikle ölçümlemiştir. Daha sonra ölçüledikleri bu verileri faktörizasyona dayalı yüzey altı saçılımı modeli ile sunmuşlardır. Peers et al.'dan (2006) hem ölçüledikleri veriler hem de yüzey altı saçılımı modelinin sunumu için gerekli veriler temin edilmiştir.

Peers et al. (2006), Eşitlik (2.2)'deki integrali, yüzeyden hemen yansıtılan ışığı hesaba alan lokal bileşene L_l ve bir global bileşene L_g ayırarak düşünmüştür:

$$L_o(x_o, \vec{\omega}_o) = L_l(x_o, \vec{\omega}_o) + L_g(x_o, \vec{\omega}_o). \quad (3.1)$$

Lokal bileşen L_l ve global bileşen L_g şu şekilde tanımlanabilir:

$$L_l(x_o, \vec{\omega}_o) = \int_{\Omega} L_i(x_o, \vec{\omega}_i) f_s(x_o, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}_o) d\vec{\omega}_i, \quad (3.2)$$

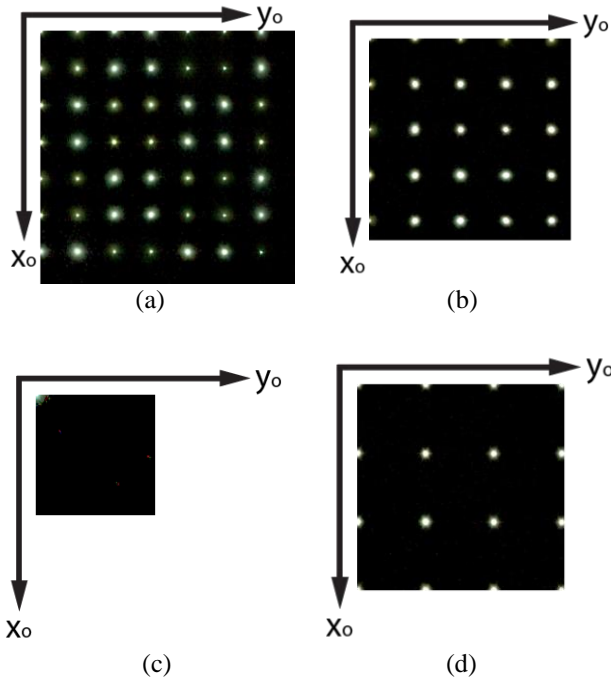
$$L_g(x_o, \vec{\omega}_o) = \int_A \int_{\Omega} L_i(x_i, \vec{\omega}_i) S_d(x_i, \vec{\omega}_i; x_o, \vec{\omega}_o) d\vec{\omega}_i dx_i, \quad (3.3)$$

burada f_s uzaysal olarak değişen SVBRDF'dir, S_d "diffuse" BSSRDF'dir ve \vec{n}_o ise x_o 'daki yüzey normalidir. Peers et al. (2006) her ne kadar bunun hatalı olduğunu kabul etse de, ölçümleme sırasında lokal bileşenin olmadığını varsaymışlardır ve bu durumun kendi geliştirdikleri faktörizasyona dayalı yüzey altı saçılımı modelinde herhangi bir sorun çıkarmadığını belirtmişlerdir. Buna göre, Peers et al. (2006) sadece heterojen yarı saydam malzemelerde global bileşeni ölçümlemişlerdir ve "diffuse" BSSRDF S_d 'yi modellemeye çalışmışlardır. "Diffuse" BSSRDF genellikle daha düşük boyutlu fonksiyonların çarpımı şeklinde sunulabilir. S_d için en çok kullanılan ayrıştırılmış form Eşitlik (2.5)'deki gibidir.

Peers et al.'da (2006), Goesele et al. (2004) gibi sadece heterojen yarı saydam malzemelerin 4D $R_d(x_i, x_o)$ uzaysal bileşenini ölçümlemeye çalışmışlardır ve yönsel bağımlı olan bileşenleri ($F_t(x_i, \vec{\omega}_i)$ ve $F_t(x_o, \vec{\omega}_o)$) göz ardı etmişlerdir.



Şekil 3.1. Peers et al.'in (2006) üzerinde ölçümler yaptığı heterojen yarı saydam mermer satranç tahtası malzemesinin bir fotoğrafı.



Şekil 3.2. Peers et al.'in (2006) ölçümlediği ham “diffuse” saçılma yansıma verisi $R_d(x_i, x_o)$. Bütün şekiller için $x_i = y_i = 0$ 'dır, ve satırlar x_o 'yu, sütunlar y_o 'yu göstermektedir. (a) Satranç tahtası (4×4) malzemesi, (b) Satranç tahtası (8×8) malzemesi, (c) Mermer (yakın çekim) malzemesi, (d) Yoğun damarlı mermer malzemesi.

Tablo 3.1. Peers et al.'in (2006) ölçümlediği heterojen yarı saydam mazemelerle ilgili detaylar.

Örnek Malzeme	Fiziksel Büy. (cm^2)	Çözünürlük (piksel)	Çekirdek Büy. (piksel)
Satranç tahtası (4×4)	12.6×12.6	277×277	29×29
Satranç tahtası (8×8)	25.1×25.1	222×222	39×39
Mermer (yakın çekim)	2.6×2.6	128×128	39×39
Yoğun damarlı mermer	13.0×13.0	213×211	29×29

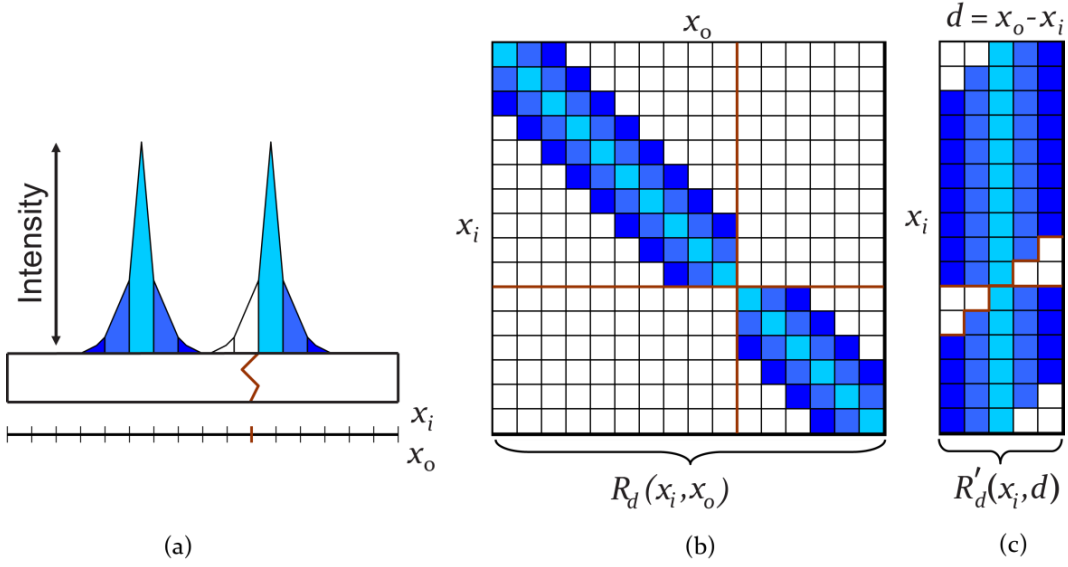
3.2 Test Verilerinin Tahminleme İçin Hazırlanması

Peers et al.'dan (2006) temin edilen test verileri, heterojen yarı saydam malzemelerden ölçümlenmiş Eşitlik (2.5)'deki $R_d(x_i, x_o)$ uzaysal yüzey altı saçılımı bileşenidir. Elde edilen ham veriler Şekil 3.2'den de görüleceği üzere her bir (x_i, y_i) noktası için birden çok yansıma değerine sahip olabilmektedir. Öncelikle bu verilerin işlenerek faktörizasyona uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için her bir heterojen yarı saydam malzemede belirli çekirdek büyüklükleri kullanılmıştır. Buna göre her bir (x_i, y_i) noktasında bu çekirdek büyüklüğünün içinde kalan (x_o, y_o) verileri dikkate alınmış, diğerleri sıfır olarak kabul edilmiştir. Her bir malzeme için kullanılan çekirdek büyüklükleri ve ölçümlenen yarı saydam malzemelerin fiziksel büyüklükleri Tablo 3.1'de görülebilir. Burada diğer bir önemli nokta ise (x_i, y_i) ve (x_o, y_o) çiftlerinde lineerleştirme işlemi uygulanmasıdır. Bu sayede 2 boyutlu $R_d(x_i, x_o)$ yüzey altı saçılımı verisi elde edilerek faktörizasyona uygun hale getirilmiştir. Hazırlanan bu veri referans görüntünün elde edilebilmesi için görüntüleme prosedüründe de kullanılabilir (ölçümlenmiş ham “diffuse” yüzey altı saçılımı yansıma verilerinin faktörizasyona uygun hale getirilmesi ve görüntülenmesi sırasında Pieter Peers ile temasa geçilerek kendisinden destek alınmıştır).

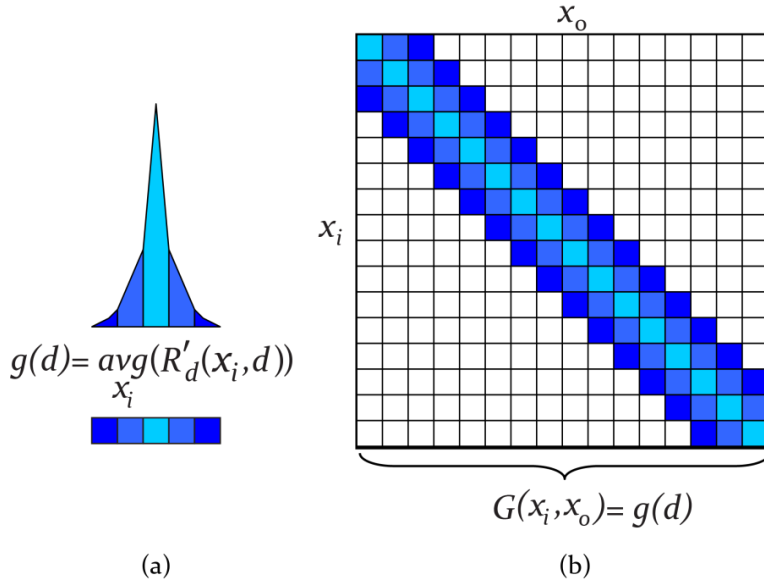
Peers et al. (2006), $R_d(x_i, x_o)$ 'yi daha az yer tutacak bir şekilde sunmak için faktörizasyon yöntemi kullanmıştır. Ancak $R_d(x_i, x_o)$ 'ye faktörizasyon uygulamadan önce $R_d(x_i, x_o)$ 'ye yeniden parametrisasyon uygulamak yerine $R_d(x_i, x_o)$ 'nin homojen kısmını veriden elde edip sadece heterojen kısmına faktörizasyon uygulamıştır.

Buna göre, Peers et al. (2006) öncelikle $R_d(x_i, x_o)$ 2D matrisini daha kompakt bir şekilde sunmak için onu $d = x_o - x_i$ olmak üzere $R'_d(x_i, d)$ şeklinde yeniden parametrize etmiştir. Şekil 3.3'de bu yeniden parametrize edilmiş $R'_d(x_i, d)$ matrisi görülmektedir.

Peers et al. (2006) bu yeniden parametrize edilmiş matris $R'_d(x_i, d)$ üzerinden, bir $g(d)$ ortalama tepkime fonksiyonu hesaplamıştır. Bunun için $R'_d(x_i, d)$ matrisinin her kolonunun ortalamasını almıştır. $g(d)$ fonksiyonu aslında homojen yüzey altı saçılımı kısmı için oldukça iyi bir yaklaşımdır ve $R_d(x_i, x_o)$ 'nin homojen yaklaşımı olan $G(x_i, x_o)$ 'yu oluşturmak için kullanılabilir (Bakınız Şekil 3.4).



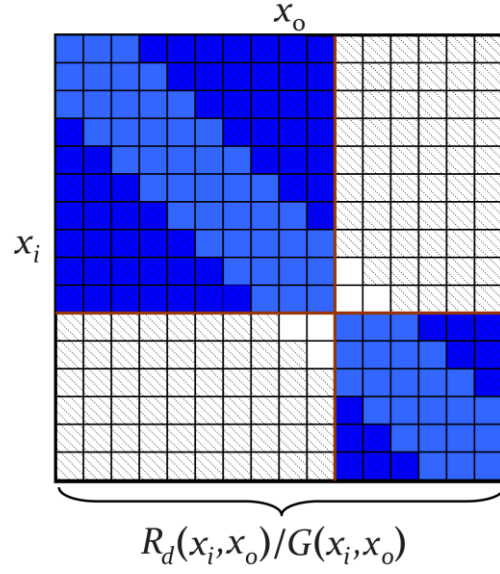
Şekil 3.3. R_d yüzey altı saçılımı matrisinin sunumu. (a) Işığın bloklayan bir damar içeren heterojen bir materyalin gösterimi. (b) Buna karşılık gelen R_d yüzey altı saçılımı matrisi. Dikkat edilirse ışığı bloklayan damar etkisini yatay ve dikey kesiklikler şeklinde göstermiştir. (c) R_d 'nin yeniden parametrize edilerek daha kompakt bir şekilde sunulmuş hali (Peers et al, 2006).



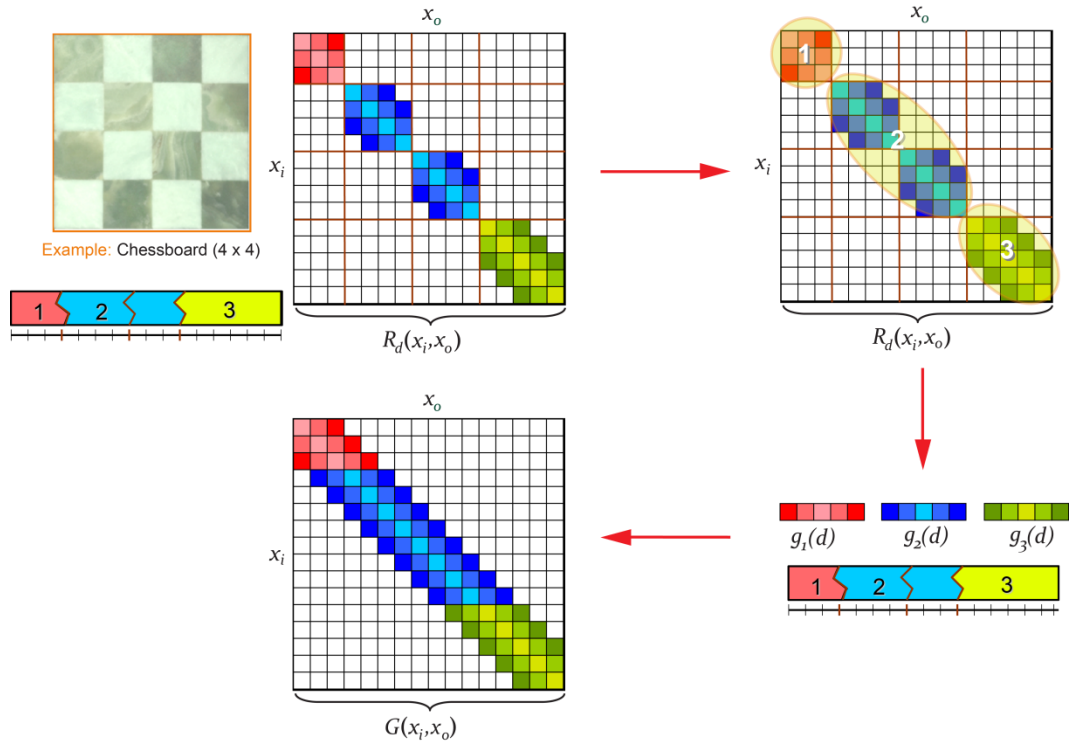
Şekil 3.4. Ortalama tepkime $g(d)$ kullanılarak, $R_d(x_i, x_o)$ yüzey altı saçılımı matrisinin homojen kısmı olan $G(x_i, x_o)$ matrisi elde edilebilir (Peers et al., 2006).

$$G(x_i, x_o) = g(d) = g(x_o - x_i). \quad (3.4)$$

Peers et al. (2006), daha sonra $R_d(x_i, x_o)$ yüzey altı saçılımı matrisini, $G(x_i, x_o)$ ile eleman eleman bölerek, efektif bir şekilde diyagonal yüzey altı saçılımı özelliklerini dışarı almıştır. Bu durum Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Daha sonra



Şekil 3.5. Homojen kısmın yaklaşımı olan $G(x_i, x_o)$ matrisi $R_d(x_i, x_o)$ içindeki diyagonal yüzey altı saçılımı özelliklerini elimine etmek için kullanılabilir. Çizgili elemanlar sıfıra bölme sonucu oluşmuştur. Bu elemanların değerleri, sonuç matrisin faktörizasyon için daha uygun bir hale getirilecek şekilde anlamlı değerlerle doldurulmalıdır (Peers et al., 2006).



Şekil 3.6. Satranç tahtası gibi birden çok yarı saydam malzemeden oluşan kompozit heterojen malzemelerde Peers et al. (2006) $g(d)$ matrislerini öbeleme yolunu seçmişlerdir. Daha sonra her bir öbeğin ortalaması alınarak her bir öbek için $g(d)$ vektörlerini ayrı ayrı hesaplamışlar ve daha sonra bu $g(d)$ vektörlerinden $G(x_i, x_o)$ matrislerini hesaplamışlardır (Peers et al., 2006).

$R_d(x_i, x_o)/G(x_i, x_o)$ matrisine faktörizasyon uygulamıştır. Buna göre, sonuç $R_d(x_i, x_o)$ matrisi şu şekilde elde edilmektedir:

$$R_d(x_i, x_o) \approx (R_d(x_i, x_o)/G(x_i, x_o)) * G(x_i, x_o), \quad (3.5)$$

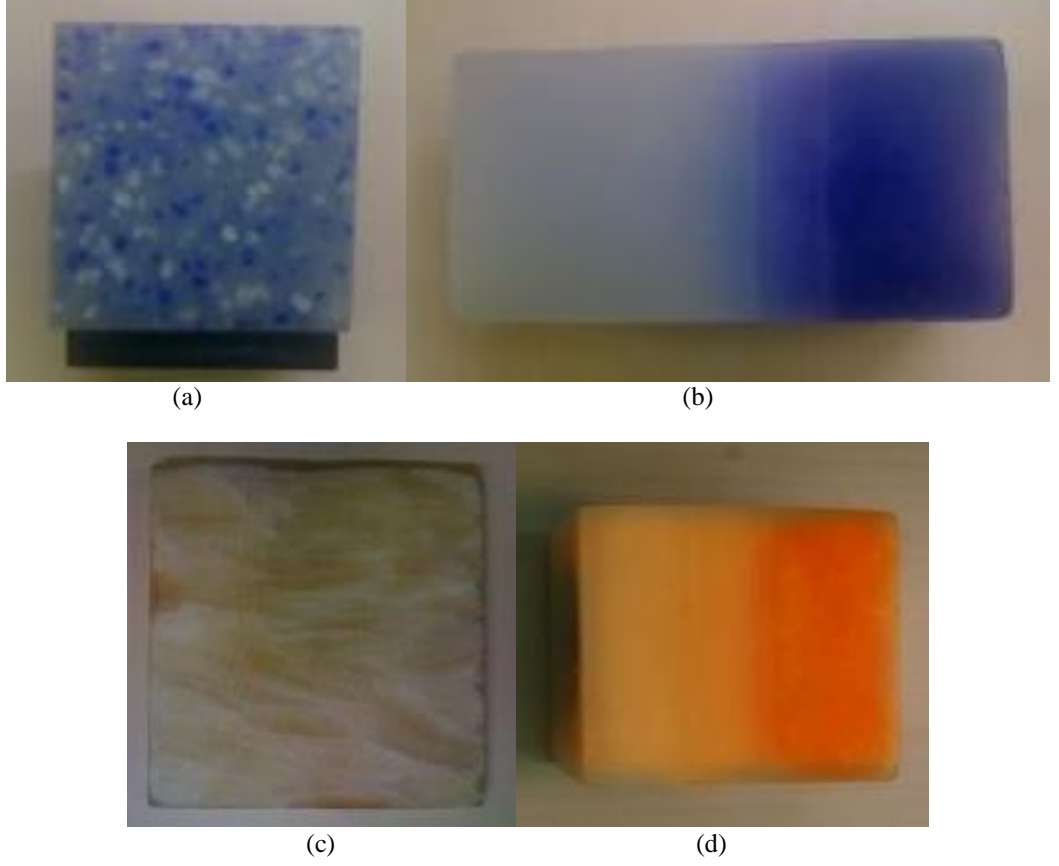
burada * eleman eleman çarpım anlamına gelmektedir; $(A * B)_{ij} = a_{ij}b_{ij}$.

Peers et al.'ın (2006) yaptığı gibi, $G(x_i, x_o)$ matrisi yalnızca $g(d)$ depolanarak ve görüntüleme esnasında $g(d)$ kullanılarak yeniden elde edilebilir. $R_d(x_i, x_o)/G(x_i, x_o)$ matrisi ise etkin bir şekilde bileşenlerine ayrılır ve faktörizasyon bileşenleri depolanırsa, ortaya hem etkin hem de az yer tutan bir yüzey altı saçılımı modeli çıkmış olur.

Peers et al. birden çok heterojen yapıdan oluşan kompozit yarı saydam malzemeler için ise (Bakınız Şekil 3.1) elde edilen $g(d)$ vektörlerini *k-means* öbikleme algoritması ile öbikleme yolunu seçmişlerdir. Daha sonra her bir öbeğin ortalama $g(d)$ vektörlerini bulmuşlar ve bu ortalama vektörlerden $G(x_i, x_o)$ matrislerini elde etmişlerdir (Bakınız Şekil 3.6). Elde edilen veriler üzerinde yapılan çalışmalarda, kompozit yarı saydam malzemelerde bu işlemin yöntemin yaklaşım doğruluğunu arttırdığı gözlenmiştir. Ancak yöntemin dezavantajı ise *k-means* öbikleme algoritmasının yavaş olmasıdır. Bu da yöntemin tahminleme zamanının yavaş olmasına neden olmaktadır. Yöntemin diğer bir dezavantajı ise *k-means* öbikleme algoritmasının çok etkin olmamasıdır.

Song et al. (2009) ise yapay taş, mavi mum, yeşim taşı, sarı mum (Şekil 3.7'ye bakınız) gibi heterojen yarı saydam malzemelerden bazılarını Peers et al.'ın (2006) ölçümleme tekniğine benzer bir şekilde ölçümlemişlerdir. Daha sonra ölçümledikleri bu verileri "editing"e izin verecek bir yüzey altı saçılımı modeli ile sunmuşlardır. Song et al.'dan (2009) da hem ölçümledikleri veriler hem de yüzey altı saçılımı modelinin sunumu için gerekli veriler temin edilmiştir.

Song et al.'dan (2009) temin edilen test verileri, heterojen yarı saydam malzemelerden ölçümlenmiş Eşitlik (2.5)'deki $R_d(x_i, x_o)$ uzaysal yüzey altı saçılımı bileşenidir. Elde edilen bu verilerin de işlenerek faktörizasyona uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için her bir heterojen yarı saydam malzemede belirli çekirdek büyüklükleri kullanılmıştır. Buna göre her bir (x_i, y_i) noktasında bu çekirdek büyüklüğünün içinde kalan (x_o, y_o) verileri dikkate alınmış, diğerleri sıfır olarak kabul edilmiştir. Her bir malzeme için kullanılan çe-



Şekil 3.7. Song et al.'ın (2009) üzerinde ölçümler yaptığı heterojen yarı saydam malzemelerin fotoğrafları: (a) yapay taş, (b) mavi mum, (c) yeşim taşı, (d) sarı mum.

Tablo 3.2. Song et al.'ın (2009) ölçümlediği heterojen yarı saydam malzemelerle ilgili detaylar.

Örnek Malzeme	Çözünürlük (piksel)	Çekirdek Büy. (piksel)
Mavi mum	88 × 232	35 × 35
Yapay taş	108 × 108	35 × 35
Yeşim taşı	260 × 260	35 × 35
Sarı mum	110 × 110	39 × 39

çekirdek büyüklükleri ve ölçümlenen yarı saydam malzemelerin çözünürlükleri Tablo 3.2'de görülebilir. Burada diğer bir önemli nokta ise (x_i, y_i) ve (x_o, y_o) çiftlerinde lineerleştirme işlemi uygulanmasıdır. Bu sayede 2 boyutlu $R_d(x_i, x_o)$ yüzey altı saçılımı verisi elde edilerek faktörizasyona uygun hale getirilmiştir. Hazırlanan bu veri referans görüntünün elde edilebilmesi için görüntüleme prosedüründe de kullanılabilir (ölçülenmiş ham “diffuse” yüzey altı saçılımı yansıma verilerinin faktörizasyona uygun hale getirilmesi ve görüntülenmesi sırasında Xin Tong ve Yue Dong ile temasa geçilerek kendilerinden destek alınmıştır).

Bu tez kapsamında, Peers et al.'dan (2006) ve Song et al.'dan (2009) temin edilen veriler, yukarıda bahsedildiği şekilde hazırlanmış ve $R_d(x_i, x_o)$ verisi faktörizasyon tabanlı yöntemlerle modellenmeye çalışılmıştır. Sonuçta, etkin, az yer tutan ve görsel doğruluğu yüksek yeni yüzey altı saçılımı modelleri elde edilmesi amaç edinilmiştir.

4. YÜZEY ALTI SAÇILIMININ TUCKER FAKTORİZASYONU İLE MODELLENMESİ

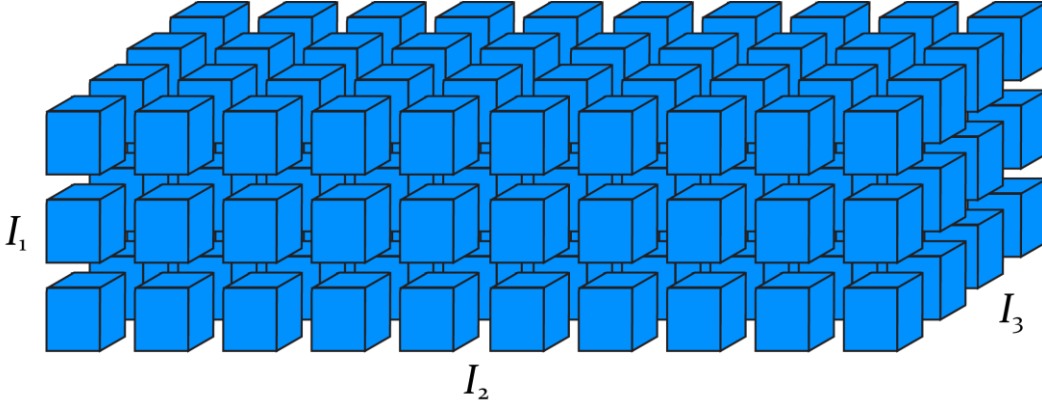
4.1 Tensörler Ve Tensör Ayırıştırma Yöntemleri

Tez çalışmasının bu kısmında tensör ayırıştırmaya dayanan bir yüzey altı saçılımı modelinin heterojen yarı saydam malzemeleri modellemek amacıyla geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yüzey altı saçılımı verisi modellenirken tensör olarak işlenmektedir. Tensörler çok boyutlu dizilerdir. N-way veya N-dereceli tensörler, her biri kendi koordinat sistemine sahip N adet vektör uzayının tensör çarpımıyla gösterilmektedirler (Kolda and Bader, 2009). Birinci dereceden bir tensör, vektörü, ikinci dereceden bir tensör, matrisi, 3 veya daha fazla boyutlu tensörler (bakınız Şekil 4.1) yüksek dereceli tensörleri ifade etmektedir.

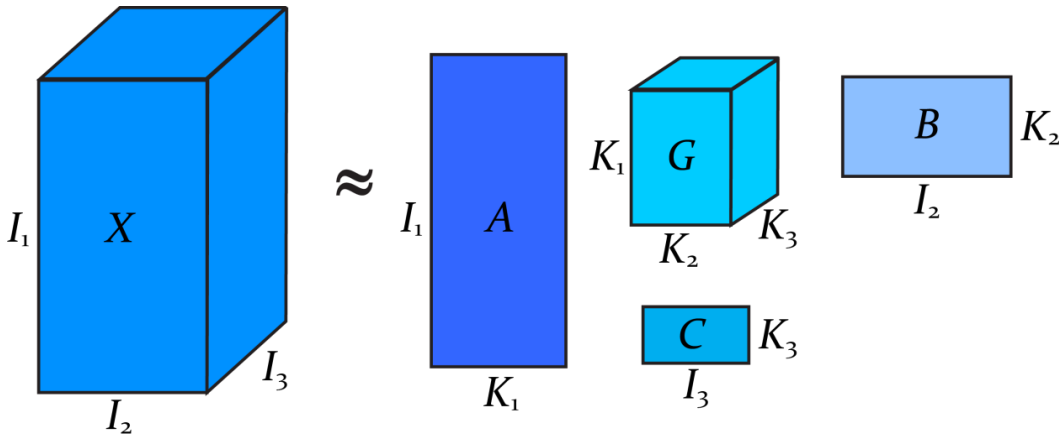
Tensörler, tensör ayırıştırma teknikleriyle bileşenlerine ayrılarak, her bileşen ayrı ayrı incelenebilmektedir. En temel tensör ayırıştırma yöntemleri olarak CANDECOMP/PARAFAC (Chang and Carroll, 1970; Harshman, 1970) ve Tucker (Tucker, 1963; Tucker, 1964; Tucker, 1966) yöntemleri, yüksek dereceden Tekil Değer Ayırıştırma (SVD - Singular Value Decomposition) (Trefethen and Bau, 1997) ve Temel Bileşenler Analizi (PCA - Principal Component Analysis) (Kramer, 1998) görülebilmektedir.

Tensörleri bileşenlerine ayırıştırma işlemleri ilk kez Hitchcock (Henrion, 1994; Hitchcock, 1927) tarafından 1927'de gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, 1944 yılında, çok boyutlu tensörlerin incelenmesi şeklinde Cattell (Cattell, 1944; Cattell, 1952) tarafından genelleştirilmiştir. Tucker (Tucker, 1963; Tucker, 1964; Tucker, 1966), Chang and Carroll (1970) ve Harshman'ın (1970) tensörleri 70'lerde psikometride kullanmasına kadar yeterince ilgi görmemişlerdir (Kolda and Bader, 2009). Appellof and Davidson (1981) tensör ayırıştırma yöntemlerini kemometride ilk kez kullananlar olarak anılmaktadırlar (Kolda and Bader, 2009).

Son 15 yılda tensör ayırıştırma yöntemleri oldukça dikkat çekmiştir. Bilgisayar grafikleri (Ozturk et al., 2008; Sun et al., 2007), sinyal işleme (Lathauwer and Moor, 1998; Lathauwer et al., 2007; Lathauwer and Baynast, 2007), numerik lineer cebir (Lathauwer and Moor, 1998; Lathauwer et al., 2000a; Lathauwer et al., 2000b; Lathauwer et al., 2001), bilgisayar görme sistemleri (Vasilescu and Terzopoulos, 2002a; Vasilescu and Terzopoulos, 2002b; Vasilescu and Terzopoulos, 2003), numerik analiz (Berry et al., 1995; Beylkin and Mohlen-



Şekil 4.1. 3 boyutlu bir tensör (Pajarola et al., 2013).



Şekil 4.2. 3 boyutlu X tensörünün Tucker yöntemi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen bileşenler. A, B ve C iki boyutlu matrisler, G, X ile aynı boyut sayısına sahip tensördür (Harshman, 1970).

kamp, 2002; Hackbusch et al., 2005), veri arama (Acar et al., 2005; Acar et al., 2006; Bader et al., 2007; Bader et al., 2007), çizge analizi (Bader et al., 2007; Kolda and Bader, 2006; Kolda et al., 2005) gibi bir çok alanda başarı ile kullanılmışlardır (Kolda and Bader, 2009).

Bilgisayar grafikleri alanında ise BRDF verisinin tensör ayrıştırma yöntemleri ile modellendiği görülmektedir (Lawrence et al., 2004; Sun et al., 2007; Bilgili et al., 2011). Lawrence et al. (2004) bir çeşit tensör ayrıştırma yöntemi olan NMF (Lawrence et al., 2004) yöntemini kullanarak ölçümlenmiş BRDF verisinin modellemesini ve önemine göre örneklemesini gerçekleştirmiştir. Bu yöntemi tercih etmelerinin sebebi ise BRDF verisinin daima pozitif olması ve ayrıştırma işlemlerinin negatif sonuçlar üretmemesi gerekliliği olmuştur.

Sun et al. (2007) ise çalışmalarında diğer bir tensör ayrıştırma tekniği olan Tucker yöntemini BRDF'i modellemek ve gerçek zamanlı olarak gösterebilmek için kullanmışlardır. Bu yöntemin dezavantajı ise Tucker yönteminde kullanılan matrislerin boyutlarının büyük seçilmiş olması ve hesaplama maliyetinin önemli miktarda arttırılarak BRDF modellemesi gerçekleştirilmiş olmasıdır. Son olarak, Bilgili et al. (2011) ise Tucker yöntemiyle ölçümlenmiş BRDF verisini modellemiştir ve önemine göre örnekleme gerçekleştirmiştir.

Peers et al. (2006) da, Lawrence et al. (2004) gibi bir çeşit tensör ayrıştırma yöntemi olan NMF (Paatero and Tapper, 1994) yöntemini kullanıp yüzey altı saçılımı verisini modellemiştir. Bu yöntemi tercih etmelerinin sebebi yüzey altı saçılımı verisinin daima pozitif olması ve ayrıştırma işlemlerinin negatif sonuçlar üretmemesi gerekliliği olmuştur.

Tez çalışmasının bu kısmında, Peers et al.'ın (2006) çalışmasında olduğu gibi faktörizasyon yöntemi kullanılmış ve yüzey altı saçılımı verisi Tucker yöntemi ile modellenmiştir. Bu sayede daha az yer tutan, hesaplama maliyeti daha düşük ve yaklaşım doğruluğu daha yüksek bir yüzey altı saçılımı modeli elde edilmiştir.

4.2 Tucker Yöntemi

Tucker yöntemi ile çok boyutlu diziler olarak ele alınan tensörler, iki boyutlu matrisler ile bu matrisler arasındaki ilişkiyi tanımlayan çekirdek tensörü biçiminde ifade edilmektedir. Şekil 4.2'de 3 boyutlu bir tensörün Tucker yöntemi uygulanması sonucu elde edilen bileşenleri görülmektedir.

Peers et al.'dan (2006) temin edilen yüzey altı saçılımı verisi ($R_d(x_i, x_o)$) Bölüm 3.2'de anlatıldığı şekilde hazırlandıktan sonra Tucker yöntemi kullanılarak bileşen analizi yapılmıştır.

Tucker yönteminde bileşenlere ayırma işlemi Alternatif En Küçük Kareler (Alternating Least Squares - ALS) (Kolda and Bader, 2009) adı verilen algoritma kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Veri seti bir MATLAB paketi olan N-Way Toolbox (Andersson and Bro, 2000) kullanılarak bileşenlerine ayrılmıştır.

4.2.1 ALS algoritması

Veri setleri, Tucker yönteminde ALS algoritması kullanılarak birleşenlerine ayrıştırılmaktadır (Kolda and Bader, 2009). N boyutlu tensörler ALS algoritması ile daha önce de bahsedildiği gibi 2 boyutlu matrisler ve bir çekirdek tensörüne dönüştürülmektedir (bakınız Şekil 4.2). Tüm işlemler matrisler yardımı ile iteratif bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

N boyutlu bir X tensörünün ($X \in \mathfrak{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$ ve $I_1, I_2, \dots, I_N \in \mathbb{Z}$) matrise dönüştürülmüş haline, tensörün $X_{(n)}$ modu adı verilmektedir (Kolda and Bader, 2009). Dönüştürülme sırasında *mode- n fiberler* adı verilen vektörel bilgi kullanılmaktadır (bakınız Şekil 4.3). Fiberler, matrislerdeki satır ve sütunların daha yüksek boyutlardaki tensörlerle ifade edilme biçimi olmaktadır (Kolda and Bader, 2009).

Mode- n fiberler ($1 \leq n \leq N$ ve $n \in \mathbb{Z}$) ALS algoritmasında kullanılacak özel bir $X_{(n)}$ matrisini oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu matris oluşturulurken kolonlar birer *Mode- n fiber* olacak şekilde yerleştirilmektedir (Kolda and Bader, 2009).

(I_1, I_2, \dots, I_N) , $X \in \mathfrak{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$ tensörünün her bir elemanının indeksini ve (i_n, j) 'de $X_{(n)}$ matrisinin bir elemanının indeksini göstermek üzere, (i_n, j) iki boyutlu indeksinde j değerleri aşağıdaki gibi elde edilmektedir (Kolda and Bader, 2009).

$$j = 1 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq n}}^N (i_k - 1) \prod_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{k-1} I_m, (1 \leq i_1 \leq I_1, 1 \leq i_2 \leq I_2, \dots, 1 \leq i_N \leq I_N \text{ ve } i_1, i_2, \dots, i_N \in \mathbb{Z}). \quad (4.1)$$

Tucker yönteminde ALS algoritmasının uygulanması için gereken diğer bir özel işlem de Kronecker çarpımıdır (Horn and Johnson, 1991). Bu çarpım da aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$A \otimes B = \begin{bmatrix} a_{11}B & a_{12}B & \cdots & a_{1J}B \\ a_{21}B & a_{22}B & \cdots & a_{2J}B \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{I_1}B & a_{I_2}B & \cdots & a_{IJ}B \end{bmatrix}, A \in \mathfrak{R}^{I \times J}, B \in \mathfrak{R}^{K \times L}. \quad (4.2)$$

Tucker ayrıştırılması sırasında, $X \in \mathfrak{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$ tensörü, $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(N)}$ matrisleri ile ve $G \in \mathfrak{R}^{K_1 \times K_2 \times \dots \times K_N}$ ($K_1 \leq I_1, K_2 \leq I_2, \dots, K_N \leq I_N$ ve $K_1, K_2, \dots, K_N \in \mathbb{Z}$) çekirdek tensörünün çarpımı ile ifade edilmektedir. $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(N)}$ matrislerinin boyutları da $(I_1 \times K_1, I_2 \times K_2, \dots, I_N \times K_N)$ şeklinde olmaktadır.

Ayrıştırılmış tensörün, Tucker yöntemi ile hesaplanması aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\hat{x}_{i_1, i_2, \dots, i_N} = \sum_{k_1=1}^{K_1} \sum_{k_2=1}^{K_2} \dots \sum_{k_N=1}^{K_N} g_{k_1 k_2 \dots k_N} a_{i_1 k_1}^{(1)} a_{i_2 k_2}^{(2)} \dots a_{i_N k_N}^{(N)}. \quad (4.3)$$

Matrisselleştirilmiş formu da aşağıdaki gibi olmaktadır.

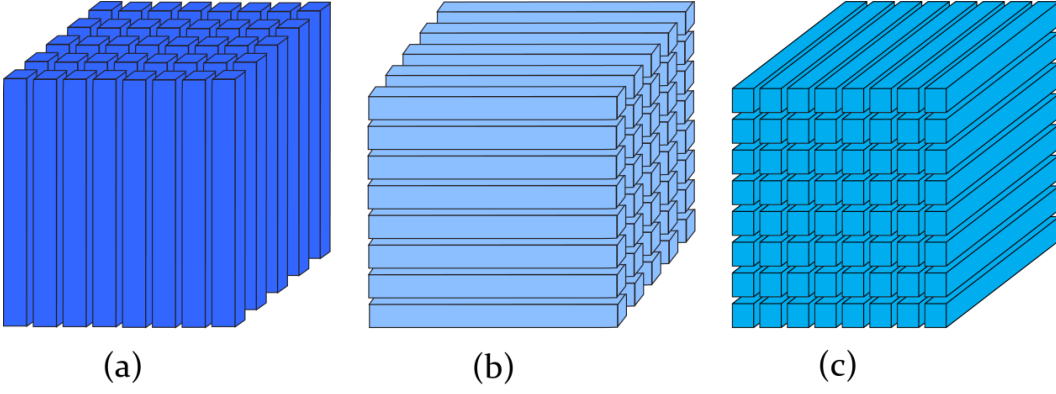
$$\hat{X}_{(n)} = A^{(n)} G_{(n)} (A^{(N)} \otimes \dots \otimes A^{(n+1)} \otimes A^{(n-1)} \otimes \dots \otimes A^{(1)})^T. \quad (4.4)$$

Ortogonalite kısıtı altındaki ALS algoritmasında

$$\|X_{(n)} - A^{(n)} G_{(n)} (A^{(N)} \otimes \dots \otimes A^{(n+1)} \otimes A^{(n-1)} \otimes \dots \otimes A^{(1)})^T\|^2, \quad (4.5)$$

minimize edilmeye çalışılmaktadır. N boyutlu $X \in \mathfrak{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$ tensörü olmak üzere, bu işlem aşağıdaki gibi yapılmaktadır:

- 1) $K_1 \leq I_1, K_2 \leq I_2, K_3 \leq I_3, \dots, K_N \leq I_N$ olacak şekilde K_1, K_2, \dots, K_N boyutları seçilir.
- 2) $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(N)}$ matrisleri rastgele değerlerle doldurulur.
- 3) Bütün $1 \leq n \leq N$ değerleri için $Z_{(n)} = X_{(n)} (A^{(N)} \otimes \dots \otimes A^{(n+1)} \otimes A^{(n-1)} \otimes \dots \otimes A^{(1)})$ hesaplanır.
- 4) Bütün $1 \leq n \leq N$ değerleri için SVD yöntemi ile $Z_{(n)} = U_{(n)} S_{(n)} V_{(n)}^T$ ayrıştırması yapılır.
- 5) Bütün $1 \leq n \leq N$ değerleri için $A^{(n)}, U_{(n)}$ matrisinin ilk K_n kolonu ile doldurulur.
- 6) $G_{(1)} = A^{(1)} X_{(1)} (A^{(N)} \otimes \dots \otimes A^{(n+1)} \otimes A^{(n-1)} \otimes \dots \otimes A^{(2)})$ hesaplanır.



Şekil 4.3. 3 boyutlu bir tensörde fiberler. (a) Mode-1 fiberler x_{jk} (b) Mode-2 fiberler $x_{i,k}$ (c) Mode-3 fiberler x_{ij} . (Pajarola et al., 2013).

7) $S = \|X_{(1)} - A^{(1)}G_{(1)}(A^{(N)} \otimes \dots \otimes A^{(n+1)} \otimes A^{(n-1)} \otimes \dots \otimes A^{(1)})^T\|^2$ hatası hesaplanır.

8) S değerine göre belirlenen hata kritiği koşulları sağlamamışsa, algoritma 3. aşamadan itibaren tekrar çalıştırılır.

Algoritma orjinal X tensörüne yakınsamaktadır. K_1, K_2, \dots, K_N Tucker parametrelerinin büyük seçilmesi yakınsama süresini hızlandırmakta ve yaklaşım doğruluğunu arttırmakta ancak işlem miktarını ve depolama gereksinimini önemli derecede arttırmaktadır.

ALS algoritmasında, ortogonalite kısıtı dışında, NMF algoritmasında olduğu gibi pozitifliğe zorlama da gerçekleştirilebilir. Ancak “diffuse” yüzey altı saçılımı veri setinde yaptığımız çalışmalarda pozitifliğe zorlama durumunda hatanın arttığı görülmüştür. Dolayısıyla modellenen veriyi pozitif alanda tutmak için görüntüleme sırasında bir takım kısıtlamalar uygulanmıştır.

4.3 Heterojen Yüzey Altı Saçılımı Verisinin Tucker Yöntemi İle Modellenmesi

Bu bölümde, heterojen yarı saydam malzemelerin yüzey altı saçılımı etkilerini sunmak için önerdiğimiz kompakt ve etkin olan Tucker faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modelimizden bahsedeceğiz. Daha sonra ise, modelimizin sunumsal esnekliğine kısaca değineceğiz.

4.3.1 Ön-işlem

Ölçümlenmiş “diffuse” yüzey altı saçılımı verisi $R_d(x_i, x_o)$, Bölüm 3.2’de anlatıldığı şekilde hazırlanmıştır. Peers et al.’ın (2006) veriyi modelleme prosedürü de incelendiğinde aslında ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisinin en kompakt halinin Şekil 4.4(b)’den de görüleceği üzere $R'_d(x_i, d)$ hali olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, faktörizasyonun etkinliğini arttırmak için Xu et al.’ın (2011) yöntemine benzeyen bir teknik kullanılmıştır. Buna göre, $R'_d(x_i, d)$ verisinin her x_i satırının maksimum değeri, o satırın ilk elemanı olacağı şekilde kaydırılmıştır ve her x_i satırı o satırın maksimum değerine bölünmüştür. Şekil 4.4(b)-(c)’den de görüleceği üzere, bu işlemin sonucunda $R''_d(x_i, d)$ matrisi elde edilmiştir. Bu işlemin iki avantajı mevcuttur. Birincisi, bu işlem benzer değerleri aynı kolonlara hizalamaktadır. Bu durumun da faktörizasyonun etkinliğini oldukça arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu işlemin ikinci avantajı ise, ölçümleme veya kalibrasyondan kaynaklanan pik değerlerde oluşabilecek herhangi bir kaymayı gidermesidir.

4.3.2 Faktörizasyon

Bölüm 4.3.1’de anlatıldığı şekilde, yeniden parametrize edilmiş $R''_d(x_i, d)$ matrisi yoğunluk değerleri $((R + G + B) / 3)$ için hazırlanmıştır. Daha sonra, Şekil 4.5’den de görüleceği üzere, etkin ve kompakt faktörizasyon için Tucker faktörizasyonu kullanılarak hata modelleme yöntemi (Bilgili et al., 2011) uygulanmıştır. Aslında bu sırada logaritmik dönüşüm gibi çeşitli dönüşümler de denenmiştir. Ancak Peers et al.’dan (2006) temin edilen veri “diffuse” yüzey altı saçılımı verisi olduğu için ve veride düşük yüzey altı yansıma değerleri bulunduğu için logaritmik transformasyon gibi üssel transformasyonların modelleme hatasını büyüttüğü gözlemlenmiştir. Hata modelleme yöntemine göre, $F(x_i, d) = R''_d(x_i, d)$ matrisini tahminlemek için aşağıdaki işlemler uygulanmıştır:

1) $F(x_i, d)$ matrisi *Tucker* yöntemi ile K_1, K_2 Tucker parametreleri (1,1) olacak şekilde tahminlenmiştir. Tahminleme sonucu $F'(x_i, d)$ matrisi elde edilmiştir. Bu matris, g^F skalar değeri ile $a_{x_i}^F, a_d^F$ vektörlerinin çarpımından oluşmaktadır.

2) Tahmin edilen $F'(x_i, d)$ değerleri ile orijinal $F(x_i, d)$ arasındaki hata $e_1(x_i, d)$ bulunmuştur.

$$e_1(x_i, d) = F(x_i, d) - F'(x_i, d). \quad (4.6)$$

3) $e_1(x_i, d)$ Tucker yöntemi ile K_1, K_2 Tucker parametreleri (1,1) olacak şekilde tahminlenmiştir. Tahminleme sonucu $e'_1(x_i, d)$ matrisi elde edilmiştir. Bu matris, g^{e_1} skalar değeri ile $a_{x_i}^{e_1}, a_d^{e_1}$ vektörlerinin çarpımından oluşmaktadır.

4) Tahmin edilen $F'(x_i, d)$ ve $e'_1(x_i, d)$ değerleri toplamının, orijinal $F(x_i, d)$ değerleri arasındaki farklar alınarak $e_2(x_i, d)$ bulunmuştur.

$$\begin{aligned} e_2(x_i, d) &= F(x_i, d) - F'(x_i, d) - e'_1(x_i, d) \\ e_2(x_i, d) &= e_1(x_i, d) - e'_1(x_i, d). \end{aligned} \quad (4.7)$$

5) $e_2(x_i, d)$ Tucker yöntemi ile K_1, K_2 Tucker parametreleri (1,1) olacak şekilde tahminlenmiştir. Tahminleme sonucu $e'_2(x_i, d)$ matrisi elde edilmiştir. Bu matris, g^{e_2} skalar değeri ile $a_{x_i}^{e_2}, a_d^{e_2}$ vektörlerinin çarpımından oluşmaktadır.

6) Benzer şekilde, her seferinde hatalar modellenerek işlem T kere tekrarlanmıştır.

Bu durumda yüzey altı saçılımı modelinin $R''_d(x_i, d)$ kısmı aşağıdaki gibi olmaktadır:

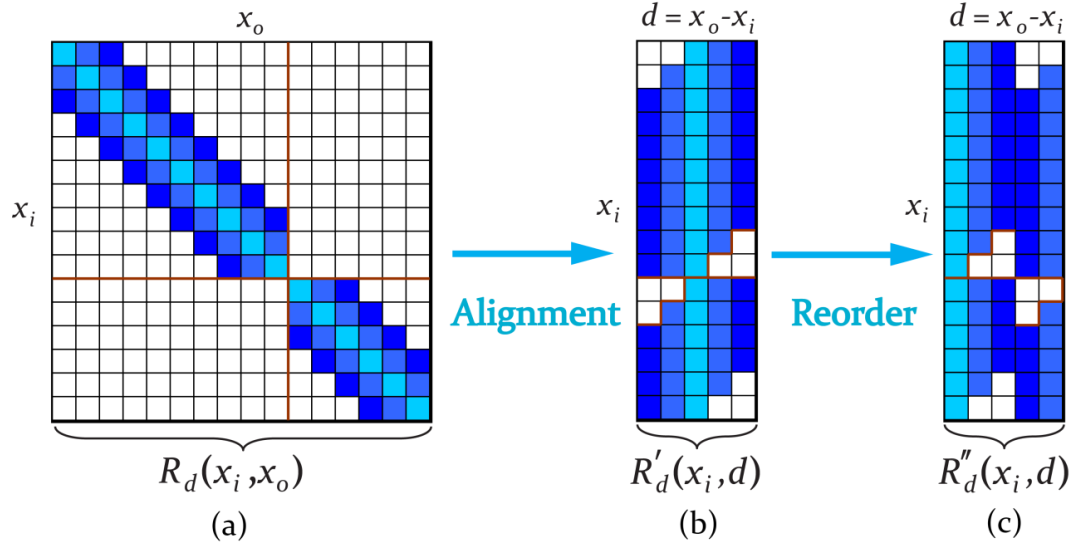
$$R''_d(x_i, d) \approx g^F a_{x_i}^F(x_i) a_d^F(d) + \sum_{j=1}^T g^{e_j} a_{x_i}^{e_j}(x_i) a_d^{e_j}(d). \quad (4.8)$$

Daha genel bir yazım şekli olarak da, her j . aşamaya ait faktörler f_j ve h_j vektörleri ve Tucker çekirdek değeri g_j skalar değeri ile gösterilirse, yüzey altı saçılımı fonksiyonunun $R''_d(x_i, d)$ kısmı aşağıdaki gibi yazılabilmektedir. Bu işlem Şekil 4.5'de görülmektedir:

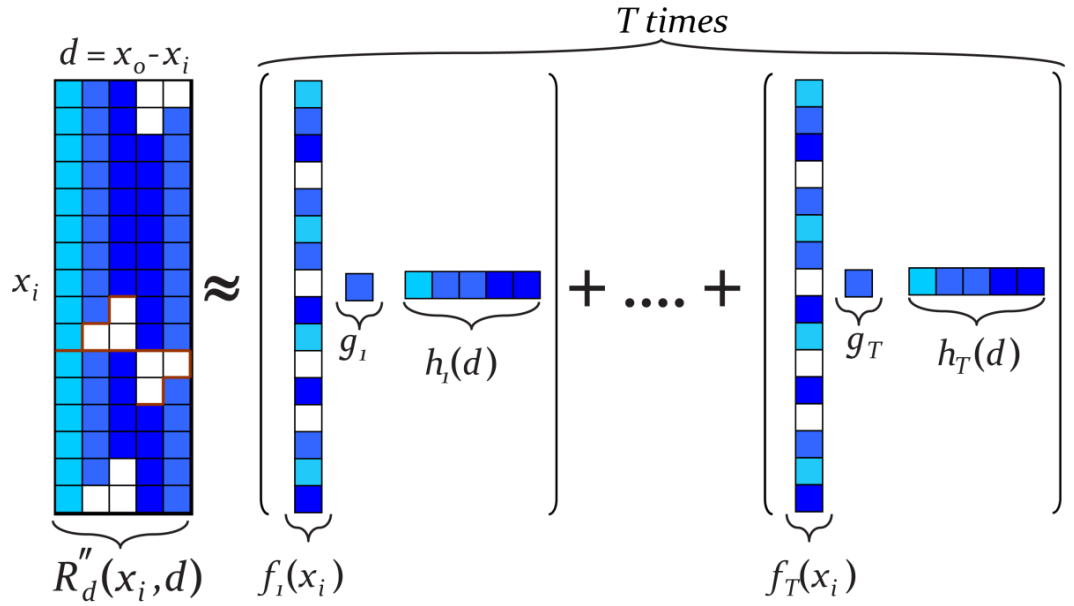
$$R''_d(x_i, d) \approx \sum_{j=1}^T g_j f_j(x_i) h_j(d). \quad (4.9)$$

Şekil 4.4'den de görüleceği üzere, tahminleme sonucunda elde edilen yüzey altı saçılımının $R''_d(x_i, d)$ kısmı, daha önceden saklanan her bir x_i satırının maksimum değeriyle çarpılır ve her bir x_i satırındaki elemanlar da maksimum eleman eski yerine gelecek şekilde dairesel ötelenir. Bu sayede yüzey altı saçılımının $R'_d(x_i, d)$ kısmı elde edilir.

Aslında burada Tucker faktörizasyonu iki boyutlu yüzey altı saçılımı verisine uygulanmaktadır. Dolayısıyla, uygulanan faktörizasyon metodu gerçekte



Şekil 4.4. (a)–(b) İlk olarak (a)'daki BSSRDF matrisi parametre değişimi ile yeniden biçimlendirilerek $R'_d(x_i, d)$ formuna getirilir. (b)–(c) Daha sonra, her bir satırdaki elemanlar her bir satırın ilk elemanı o satırın en büyük elemanı olacağı şekilde kaydırılarak yeniden dizilir. Bundan sonra ise, her satır o satırın en büyük elemanı ile bölünür. Bu işlemler sonucunda $R''_d(x_i, d)$ matrisi elde edilmektedir. $R''_d(x_i, d)$ 'den $R'_d(x_i, d)$ matrisini elde etmek için ise, sadece her satırdaki maksimum elemanın değeri ve karşılık gelen pozisyonunun saklanması gerekmektedir.



Şekil 4.5. Bilgili et al.'ın (2011) çalışmasında olduğu gibi, ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı matrisi $R''_d(x_i, d)$ 'yi sunmak için Tucker faktörizasyonu kullanılarak hata modelleme yöntemi uygulanmıştır.

klasik SVD yöntemine benzerdir. Ancak, Tucker tabanlı faktörizasyon algoritmamız ayrıca ikiden büyük boyuttaki verilerde de etkin bir şekilde

uygulanabilmektedir. Bu durum da, Tucker tabanlı algoritmamızı klasik SVD yöntemine göre avantajlı kılmaktadır.

4.3.3 Lineer regresyon

Heterojen yüzey altı saçılımı verisini sunmaya yönelik önceki çalışmalar, her bir renk kanalını ayrı ayrı ele almaktadır. Ancak, veri üzerindeki incelemelerimize göre her bir renk kanalındaki saçılma profillerinin aynı olmasa da birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın bu kısmında bu korelasyondan faydalanmaya çalışılmıştır.

Buna göre, Tucker tabanlı faktörizasyon algoritması yalnızca ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı değerlerinin ortalama değerlerine uygulanmıştır. Daha sonra ise, ortalamadan gerçekleşen sapmaları P . dereceden polinomal regresyon bir modelle tahminlenmiştir. Bu prosedüre göre, ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı matrisinin her x_i satırı için doğrusal katsayılar tahminlenmiştir. Bu durumda, her bir renk kanalı için karşılık gelen yüzey altı saçılımı modelleri şöyledir:

$$\begin{aligned}
 R_{dr}(x_i, x_o) &\approx \sum_{p=0}^P \beta_{rpx_i} R'_d(x_i, d)^p, \\
 R_{dg}(x_i, x_o) &\approx \sum_{p=0}^P \beta_{gpx_i} R'_d(x_i, d)^p, \\
 R_{db}(x_i, x_o) &\approx \sum_{p=0}^P \beta_{bpx_i} R'_d(x_i, d)^p,
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

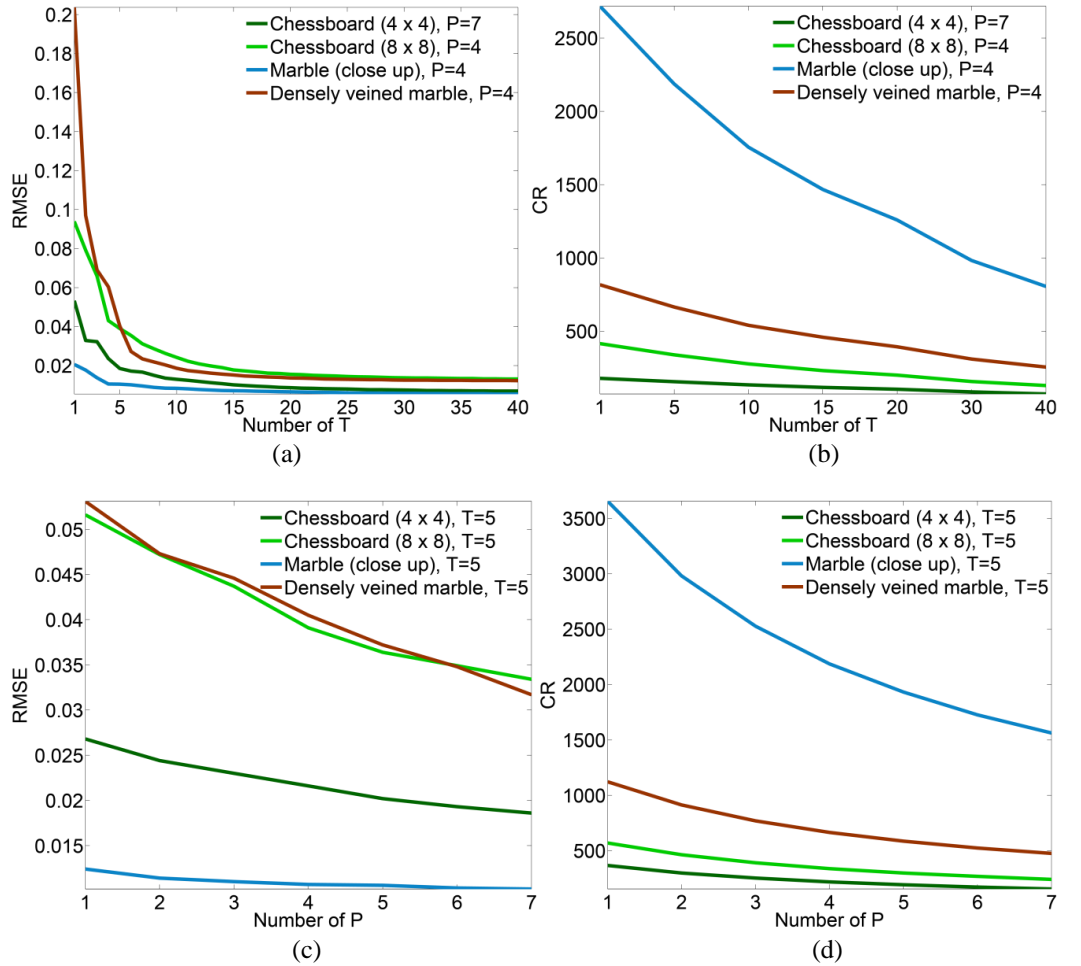
burada P polinomun derecesidir, β_{rpx_i} , β_{gpx_i} ve β_{bpx_i} modelin parametreleridir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak polinomal model yüzey altı saçılımı verisine uydurulmuştur. Daha sonra, her bir renk kanalı için yüzey altı saçılımı verileri uydurulan model kullanılarak tahminlenmiştir.

Tez çalışmasının bu kısmında önerilen lineer regresyon tabanlı yöntem renk kanalları arasındaki korelasyondan faydalanmaktadır, ve bu sayede yöntemin hata doğruluğunda çok büyük bir kayıp yaşamadan kompakt bir modelin oluşmasını sağlamaktadır. Bu yöntemin, diğer faktörizasyon tabanlı sıkıştırma teknikleriyle beraber de kullanılabilme potansiyeli bulunmaktadır. Bu çalışmada lineer regresyon tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin “diffuse” yüzey altı saçılımı verisini doğru bir şekilde sunduğu gösterilmiştir.

4.3.4 Parametre analizi

Bu tez kapsamında önerilen yüzey altı saçılımı sunumu ayarlanabilir iki adet parametreye sahiptir: T ve P . T , Tucker faktörizasyonundaki terimlerin adedidir. P ise, yüzey altı saçılımı modelinde kullanılan polinomal yaklaşımın derecesidir.

Tucker tabanlı faktörizasyon metodu, yüzey altı saçılımının genel dağılımını tahminlemede önemli bir role sahiptir. Çünkü, Tucker faktörizasyonu ortalama değerlere uygulanmaktadır. Şekil 4.6(a)'dan da görüleceği üzere, ilk 10 terim kullanıldığında, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı modeliyle yüzey altı saçılımının genel şekli doğru bir şekilde sunulabilmektedir. Tucker tabanlı faktörizasyon algoritması ortalama değerlere uygulandığı için, T sayısının sıkıştırma oranında



Şekil 4.6. (a) Değişen T değerlerine göre Tucker tabanlı modelin hata (RMSE) değerleri; (b) değişen T değerlerine göre Tucker tabanlı modelin sıkıştırma oranları (compression ratio - CR); (c) Değişen P değerlerine göre Tucker tabanlı modelin hata (RMSE) değerleri; (d) değişen P değerlerine göre Tucker tabanlı modelin sıkıştırma oranları (CR).

direkt bir etkisi mevcuttur. Diğer yandan, lineer regresyon tabanlı metod ise, renk kanalları arasındaki korelasyondan faydalanmaktadır ve yaklaşım doğruluğundan çok fazla bir kayıp vermeden kompakt bir sunumun oluşmasını sağlamaktadır. Şekil 4.6(c)'den görüldüğü üzere, polinomun derecesi arttıkça hata doğrusal bir şekilde azalmaktadır.

Tucker faktörizasyonu yalnızca renk kanallarının ortalama yoğunluk değerlerine uygulandığı için (yani, büyüklük $\sim T$ 'dir), ve polinom model ise her bir renk kanalına ayrı ayrı uygulandığı için (yani, büyüklük $\sim 3P$ 'dir) T 'ye göre P 'yi minimize etmek daha önemlidir.

5. YÜZEY ALTI SAÇILIMININ SVD YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

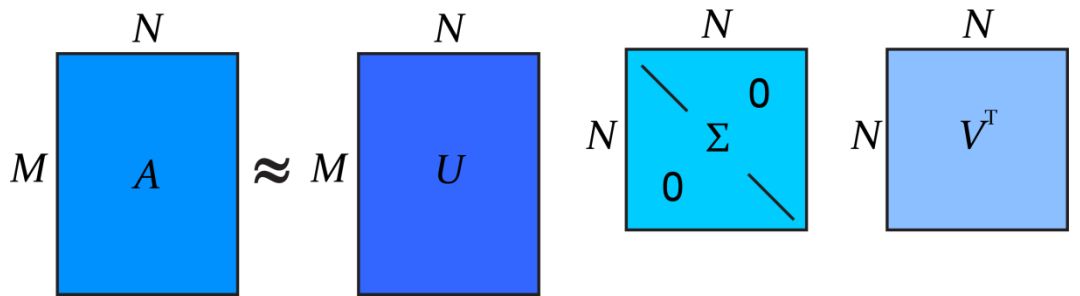
5.1 SVD Yöntemi

Bölüm 4’de de değinildiği üzere, Tekil Değer Ayrıştırma (Singular Value Decomposition - SVD) yöntemi (Trefethen and Bau, 1997), CANDECOMP/PARAFAC (Chang and Carroll, 1970; Harshman, 1970), Tucker (Tucker, 1963; Tucker, 1964; Tucker, 1966) ve Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis - PCA) (Kramer, 1998) yöntemleri gibi tensörleri ayrıştırma için kullanılan yöntemlerden biridir.

SVD yöntemini Tucker yönteminden ayıran en önemli fark ise SVD yönteminin iki boyutlu matrisler üzerinde daha etkin çalışmasıdır. İki ve daha yüksek boyutlu tensörler için ise Tucker yöntemi SVD yöntemine göre daha uygundur. SVD yöntemine göre, tensör olarak ele alınan iki boyutlu bir matris, iki boyutlu matrisler ile bu matrisler arasındaki ilişkiyi tanımlayan çekirdek tensörü biçiminde ifade edilmektedir. Bu durum Şekil 5.1’de gösterilmektedir.

Buna göre, SVD ayrıştırılması sırasında, $M \times N$ boyutlu A matrisi, $M \times N$ boyutunda U ve $N \times N$ boyutunda V matrisleri ile $N \times N$ boyutunda bir çekirdek tensörünün çarpımı ile ifade edilmektedir (bakınız Şekil 5.1). Burada, Tucker yönteminde olduğu gibi elde edilen U ve V matrislerin N boyutunun değeri bir (1) olacak şekilde seçilerek faktörizasyon gerçekleştirirse, bu durumda iki boyutlu bir matrisin SVD ile faktörizasyonu sonucunda iki adet bir boyutlu vektör ve bu vektörler arasındaki ilişkiyi tanımlayan skalar çekirdek tensörü elde edilir.

Peers et al.’dan (2006) ve Song et al.’dan (2009) temin edilen yüzey altı



Şekil 5.1. 2 boyutlu $M \times N$ boyutundaki A matrisinin SVD yöntemi ile ayrıştırılması sonucu elde edilen bileşenler. Elde edilen matrisler $M \times N$ boyutunda U ve $N \times N$ boyutunda V iki boyutlu matrislerdir. Ayrıca bir de $N \times N$ boyutunda bir çekirdek tensörü elde edilir (Pajarola et al., 2013).

saçılımı verisi ($R_d(x_i, x_o)$) Bölüm 3.2’de anlatıldığı şekilde hazırlandıktan sonra SVD yöntemi kullanılarak bileşen analizi yapılmıştır. Veri seti MATLAB’de hazır olarak bulunan SVD fonksiyonu kullanılarak bileşenlerine ayrılmıştır.

Yüzey altı saçılımı sunumlarının pozitif değerler türetmesi istenen bir özellik olduğu için modellenen yüzey altı saçılımı verisini pozitif alanda tutmak için veri üzerinde bir takım dönüşümler uygulanmıştır.

5.2 Heterojen Yüzey Altı Saçılımı Verisinin SVD Yöntemi İle Modellenmesi

Bu bölümde, heterojen yarı saydam malzemelerin yüzey altı saçılımı etkilerini sunmak için önerdiğimiz kompakt ve etkin olan SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modelimizden bahsedeceğiz. Daha sonra ise, modelimizin sunumsal esnekliğine kısaca değineceğiz.

5.2.1 Faktörizasyon

Ölçümlenmiş “diffuse” yüzey altı saçılımı verisi $R_d(x_i, x_o)$, Bölüm 3.2’de anlatıldığı şekilde hazırlanmıştır. Peers et al.’ın (2006) veriyi modelleme prosedürü de incelendiğinde aslında ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisinin en kompakt halinin Şekil 4.4(b)’den de görüleceği üzere $R'_d(x_i, d)$ hali olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, elde edilecek yüzey altı saçılımı modelinin sürekli pozitif alanda kalmasını sağlamak için veri üzerinde aşağıdaki dönüşüm uygulanmıştır:

$$R_d'''(x_i, d) = \ln\left(\frac{R'_d(x_i, d)}{A} + B\right) \quad (5.1)$$

Burada A ve B değerleri en küçük kareler yöntemine göre en küçük hata değerini verecek şekilde seçilerek belirlenmiştir.

Yukarıdaki şekilde transformasyon yapılarak elde edilen $R_d'''(x_i, d)$ matrisine, Şekil 5.2’den de görüleceği üzere, etkin ve kompakt faktörizasyon için SVD faktörizasyonu kullanılarak hata modelleme yöntemi (Bilgili et al., 2011) uygulanmıştır. Hata modelleme yöntemine göre, $F(x_i, d) = R_d'''(x_i, d)$ matrisini tahminlemek için aşağıdaki işlemler uygulanmıştır:

1) $F(x_i, d)$ matrisi SVD yöntemi sonucu elde edilecek matrisler bir boyutlu ola-

cak şekilde SVD yöntemi ile tahminlenmiştir. Tahminleme sonucu $F'(x_i, d)$ matrisi elde edilmiştir. Bu matris, g^F skalar değeri ile $a_{x_i}^F, a_d^F$ vektörlerinin çarpımından oluşmaktadır. Geliştirilen yöntemin depolama gereksinimlerini azaltmak ve görüntüleme sırasındaki hesaplama maliyetini düşürmek için, g^F skalar değeri ile $a_{x_i}^F$ vektörü çarpılmış ve yerine $b_{x_i}^F = g^F * a_{x_i}^F$ vektörü elde edilmiştir.

2) Tahmin edilen $F'(x_i, d)$ değerleri ile orijinal $F(x_i, d)$ arasındaki hata $e_1(x_i, d)$ bulunmuştur.

$$e_1(x_i, d) = F(x_i, d) - F'(x_i, d). \quad (5.2)$$

3) $e_1(x_i, d)$ matrisi SVD yöntemi sonucu elde edilecek matrisler bir boyutlu olacak şekilde SVD yöntemi ile tahminlenmiştir. Tahminleme sonucu $e_1'(x_i, d)$ matrisi elde edilmiştir. Bu matris, g^{e_1} skalar değeri ile $a_{x_i}^{e_1}, a_d^{e_1}$ vektörlerinin çarpımından oluşmaktadır. Geliştirilen yöntemin depolama gereksinimlerini azaltmak ve görüntüleme sırasındaki hesaplama maliyetini düşürmek için, g^{e_1} skalar değeri ile $a_{x_i}^{e_1}$ vektörü çarpılmış ve yerine $b_{x_i}^{e_1} = g^{e_1} * a_{x_i}^{e_1}$ vektörü elde edilmiştir.

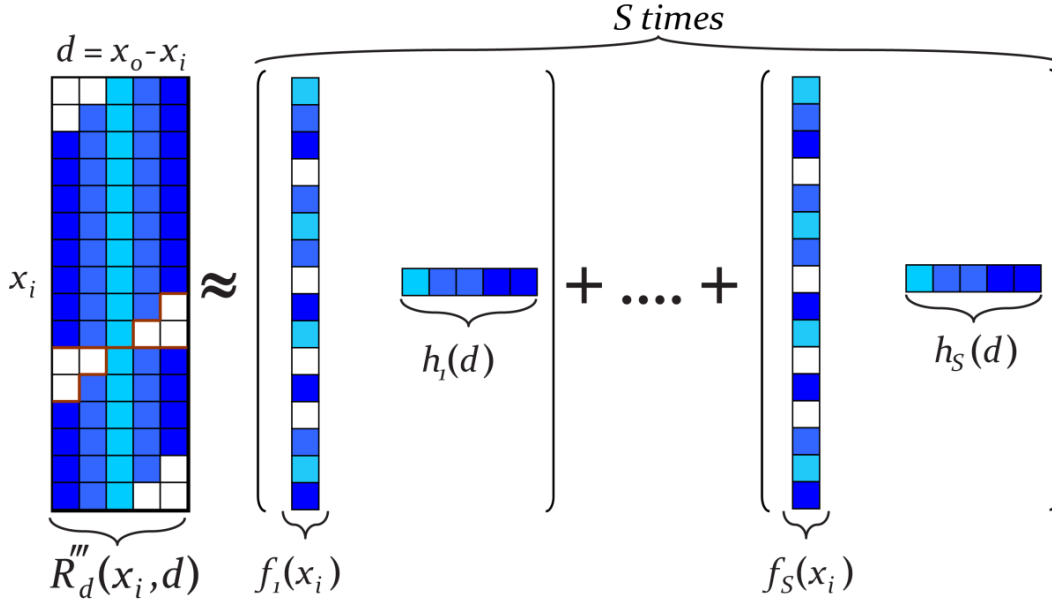
4) Tahmin edilen $F'(x_i, d)$ ve $e_1'(x_i, d)$ değerleri toplamının, orijinal $F(x_i, d)$ değerleri arasındaki farklar alınarak $e_2(x_i, d)$ bulunmuştur.

$$\begin{aligned} e_2(x_i, d) &= F(x_i, d) - F'(x_i, d) - e_1'(x_i, d) \\ e_2(x_i, d) &= e_1(x_i, d) - e_1'(x_i, d). \end{aligned} \quad (5.3)$$

5) $e_2(x_i, d)$ matrisi SVD yöntemi sonucu elde edilecek matrisler bir boyutlu olacak şekilde SVD yöntemi ile tahminlenmiştir. Tahminleme sonucu $e_2'(x_i, d)$ matrisi elde edilmiştir. Bu matris, g^{e_2} skalar değeri ile $a_{x_i}^{e_2}, a_d^{e_2}$ vektörlerinin çarpımından oluşmaktadır. Geliştirilen yöntemin depolama gereksinimlerini azaltmak ve görüntüleme sırasındaki hesaplama maliyetini düşürmek için, g^{e_2} skalar değeri ile $a_{x_i}^{e_2}$ vektörü çarpılmış ve yerine $b_{x_i}^{e_2} = g^{e_2} * a_{x_i}^{e_2}$ vektörü elde edilmiştir.

6) Benzer şekilde, her seferinde hatalar modellenerek işlem S kere tekrarlanmıştır.

Bu durumda yüzey altı saçılımı modelinin $R_d'''(x_i, d)$ kısmı aşağıdaki gibi olmaktadır:



Şekil 5.2. Bilgili et al.'ın (2011) çalışmasında olduğu gibi, ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı matrisi $R_d'''(x_i, d)$ 'yi sunmak için SVD faktörizasyonu kullanılarak hata modelleme yöntemi uygulanmıştır.

$$R_d'''(x_i, d) \approx b_{x_i}^F(x_i) a_d^F(d) + \sum_{j=1}^S b_{x_i}^{e_j}(x_i) a_d^{e_j}(d). \quad (5.4)$$

Daha genel bir yazım şekli olarak da, her j . aşamaya ait faktörler f_j ve h_j vektörleri ile gösterilirse, yüzey altı saçılımı fonksiyonunun $R_d'''(x_i, d)$ kısmı aşağıdaki gibi yazılabilmektedir. Bu işlem Şekil 5.2'de görülmektedir:

$$R_d'''(x_i, d) \approx \sum_{j=1}^S f_j(x_i) h_j(d). \quad (5.5)$$

Yüzey altı saçılımının $R_d'(x_i, d)$ kısmının elde edilmesi için ise uygun transformasyonlar ve A ve B değerleri kullanılır.

Görüntüleme sırasında depolanan yüzey altı saçılımı değerleri arasında interpolasyona ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü depolanan vektörler logaritması alınmış parçalı doğrusal fonksiyonlardır (*piecewise linear function*).

İnterpolasyon $R_d'''(x_i, d)$ hesaplanırken, $h_j(d)$ vektörünün d değerleri arasında iki çizgili doğrusal interpolasyon (bilinear interpolation) kullanılarak yapılmıştır. Bu sayede görüntüleme sırasındaki hesaplama maliyeti düşürülmüştür.

Yukarıda bahsedilen hata modellemeye dayanan SVD faktörizasyonu ve iki çizgili doğrusal interpolasyon heterojen yüzey altı saçılımı verisi üzerinde her bir

renk kanalına ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu durumda, SVD faktörizasyonuna dayanan yüzey altı saçılımı modelinin son hali şöyledir:

$$R_{dr}(x_i, x_o) \approx A * \exp(R'''_{dr}(x_i, d)) - A * B,$$

$$R_{dg}(x_i, x_o) \approx A * \exp(R'''_{dg}(x_i, d)) - A * B,$$

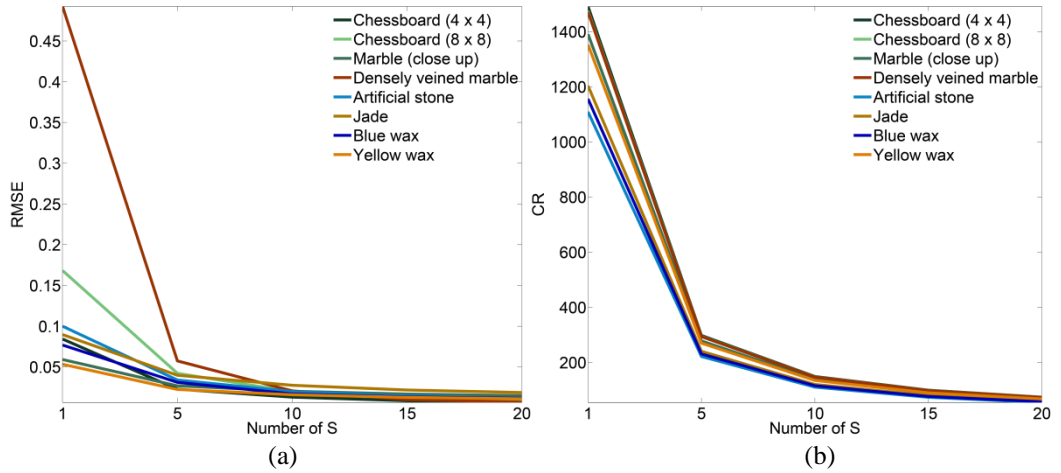
$$R_{db}(x_i, x_o) \approx A * \exp(R'''_{db}(x_i, d)) - A * B. \quad (5.6)$$

5.2.2 Parametre analizi

Tez çalışmasının bu kısmında önerilen yüzey altı saçılımı sunumu ayarlanabilir tek bir adet parametreye sahiptir: S . S , SVD faktörizasyonundaki terimlerin adedine karşılık gelmektedir.

SVD tabanlı faktörizasyon metodu, ölçümlenmiş yüzey altı saçılımını her renk kanalı için ayrı ayrı tahminlemektedir. Şekil 5.3(a)'dan da görüleceği üzere, ilk 5 terim kullanıldığında, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeliyle yüzey altı saçılımının genel şekli doğru bir şekilde sunulabilmektedir. Hatta bazı malzemelerde $S \leq 5$ değerinde bile SVD tabanlı faktörizasyon ile doğru sonuçlar elde edilmektedir. Bu durum SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin yaklaşım doğruluğundaki etkinliği göstermektedir. Bu durum ayrıca SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelini gerçek zamanlı uygulamalar için uygun kılmaktadır.

SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu, ölçümlenmiş yüzey altı saçılımının her renk kanalına ayrı ayrı uygulandığı için, S değerinin kompakt bir model için



Şekil 5.3. (a) Değişen S değerlerine göre SVD tabanlı modelin hata (RMSE) değerleri; (b) değişen S değerlerine göre SVD tabanlı modelin sıkıştırma oranları (compression ratio – CR).

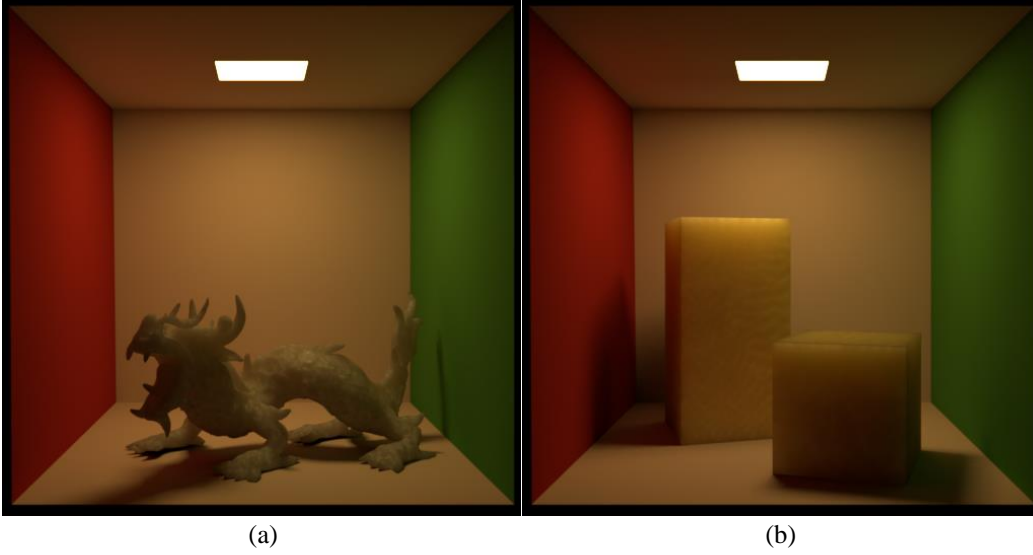
dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Şekil 5.3(b)'den de görüldüğü üzere, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeli $S \leq 5$ değerlerinde oldukça yüksek bir sıkıştırma oranına sahiptir.

6. GÖRÜNTÜLEME ALGORİTMASININ OLUŞTURULMASI

Görüntü oluşturma süreci (rendering process) 3D bir ortamın ışıklandırılarak 2D bir görüntüye aktarılması sürecidir. Işık ve malzeme arasındaki fiziksel ilişkinin görselleştirilebilmesi, geliştirilen yüzey altı saçılımı modellerinin denenmesi ve diğer modellerle karşılaştırılabilmesi için bir görüntü hesaplama programına ihtiyaç duyulmuştur.

MITSUBA (Jakob, 2013) Physically-based Rendering Toolkit (PBRT) (Pharr and Humphreys, 2013) gibi araştırma amaçlı geliştirilmiş bir görüntüleme (rendering) sistemidir. MITSUBA C++ dilinde yazılmıştır ve mevcut CPU mimarisini tam anlamıyla kullanacak şekilde oldukça yoğun bir optimizasyon içermektedir. MITSUBA'nın sağladığı diğer avantajlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- 1. Performans:** MITSUBA en çok kullanılan görüntüleme algoritmalarının optimize edilmiş uygulamalarını içermektedir.
- 2. Sağlamlılık:** Bir çok durumda, fiziksel tabanlı görüntüleme sistemleri kullanıcıların manuel olarak sahne görüntülemesinde yer alan bir çok algoritmayı gerçekleştirmesini gerektirir. MITSUBA'nın bir amacı da yol uzayı (path space) ışık transfer algoritmaları geliştirerek bu tarz durumları incelikte ele alabilmektir.
- 3. Ölçeklenebilirlik:** MITSUBA çok başarılı bir şekilde çok büyük ölçekli görüntülemeler için genişletilebilir. MITSUBA içindeki bir çok algoritma paralelleştirme katmanı kullanılarak yazılmıştır ve bu katman sayesinde MITSUBA öbek anlamında paralellik sağlamaktadır.
- 4. Gerçeklik ve Doğruluk:** MITSUBA içinde bir çok fiziksel tabanlı yansıma modeli barındırmaktadır. Bu uygulamalar karmaşık “shader” ağlarını oluşturmaya elverişli olacak bir şekilde tasarlanmışlardır, ve yol gezinimi (path tracing), foton eşleme (photon mapping), donanım olarak hızlandırılmış görüntüleme, ve iki yönlü metodlar ile uyumlu bir şekilde çalışacak şekilde tasarlanmışlardır.
- 5. Kullanım Kolaylığı:** MITSUBA bir Grafiksel Kullanıcı Arayüzü'ne (Graphical User Interface - GUI) sahiptir, ve bu sayede interaktif olarak sahnelerin kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır. İnteraktif olarak uygun bir ba-



Şekil 6.1. MITSUBA görüntüleyicisi kullanılarak yüzey altı saçılımı etkileri BSSRDF modelleri kullanılarak simüle edilebilir. Burada Jensen and Buhler'in (2002) homojen yarı saydam malzemeler için önerdikleri analitik BSSRDF modeli kullanılmıştır (a) Mermer malzemesi, (b) Patates malzemesi.



Şekil 6.2. MITSUBA görüntüleyicisi kullanılarak yüzey altı saçılımı etkileri hacimsel ışık transferi ile de simüle edilebilir. Burada eşarp objesi, Jakob et al. tarafından önerilen (2010) tam çoklu saçılma ve anizotropik saçılma modeli ile görüntülenmiştir.

kış noktası bulunduktan sonra, MITSUBA içinde bulunan bir görüntüleme algoritması kullanılarak görüntüleme gerçekleştirilebilir. MITSUBA ayrıca interaktif olarak görüntüleme algoritmalarının parametrelerinin değiştirilmesine de olanak sağlamaktadır.

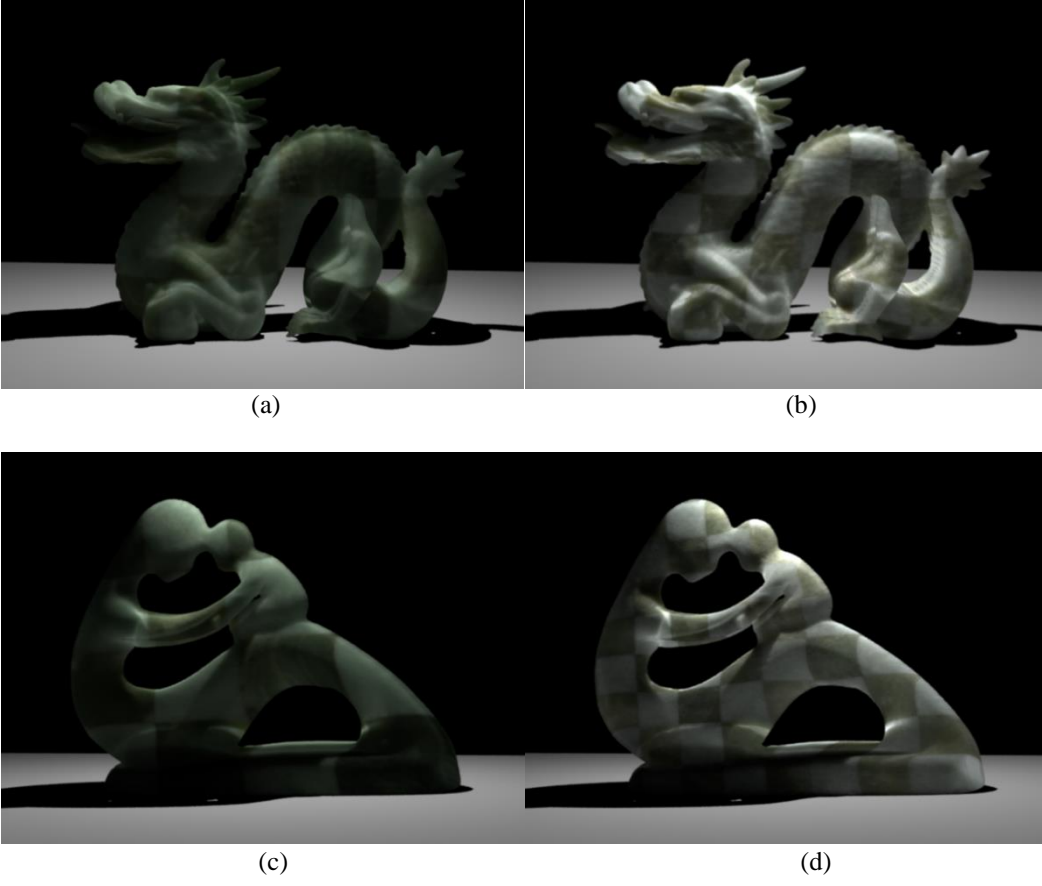
Yukarıda sayılan avantajlardan ötürü, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen faktörizasyona dayalı yüzey altı saçılımı modellerinin uygulaması MITSUBA görüntüleyicisi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'den de görüleceği üzere MITSUBA görüntüleyicisi BSSRDF modellerinin hızlı, doğru, ve etkin görüntülenmesi için uygun bir ortam sağlamaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışması kapsamında “off-line” görüntüleme için MITSUBA görüntüleyicisi kullanılmıştır.

Buna göre, Peers et al.'dan (2006) ve Song et al.'dan (2009) temin edilen heterojen yüzey altı saçılımı verisi Bölüm 3.2'de anlatıldığı şekilde hazırlanarak iki boyutlu $R_d(x_i, x_o)$ matrisi elde edilmiştir. Elde edilen bu matris ile heterojen yarı saydam malzemelerin MITSUBA görüntüleyicisi ile görüntülenmesi sağlanmıştır. Görüntüleme sırasında şöyle bir yol izlenmiştir:

- Yüzey altı saçılımı hesaplanacak olan obje örneklenir ve yüzey altı saçılımı eşlemesi oluşturulur.
- Bir ışın şayet heterojen yarı saydam malzemeye değmediyse her zamanki gibi ele alınır.
- Ancak, bir ışın heterojen yarı saydam malzemeye değdiyse yüzey altı saçılımı değerlerinin içinde kalan bütün örnekler yüzey altı saçılımı eşlemesinden elde edilerek o noktadaki tepkime ile ağırlıklandırılıp toplanır.
- Ağırlıklandırma bir yüzey altı saçılımı modelinden veya ölçümlenmiş heterojen yarı saydam malzeme verisinden elde edilen iki boyutlu $R_d(x_i, x_o)$ matrisi kullanılarak hesaplanabilir.
- Şu anki MITSUBA uygulamasında, standart doku eşlemesi (texture mapping) kullanılarak yüzey altı saçılımı modelleri objelere uygulanmıştır.

Şekil 6.3'de yukarıdaki prosedür kullanılarak ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisinin farklı objeler üzerinde görüntülenmesine dair örnekler bulunmaktadır. Şekil 6.3'den de görüleceği üzere görüntüleme algoritmasının yüzey altı saçılımı etkilerini tam olarak gösterebildiği görülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen faktörizasyonuna dayalı yüzey altı



Şekil 6.3. Peers et al.'dan (2006) temin edilen ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisinin farklı objeler üzerinde ve noktasal ışıklandırma altında görüntülenmesi. (a) ve (c) ölçümlenmiş mermer satranç tahtası (4×4) malzemesidir. (b) ve (d) ölçümlenmiş mermer satranç tahtası (8×8) malzemesidir. Monte Carlo yol gezinim algoritmasına dayanan bir algoritma ile görüntüler elde edilmiştir.

saçılımı modellerinin görüntülenmesinde ve kıyaslama amacıyla kullanılacak diğer yüzey altı saçılımı modellerinin görüntülenmesinde de benzer bir yol izlenmiştir.

7. SONUÇLAR

Bu bölümde, yüzey altı saçılımı modellerinin kıyaslanmasına yönelik elde edilen sonuçlar ile geliştirilen Tucker faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli ve SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeline ait sonuçlar verilmiştir.

7.1 Yüzey Altı Saçılımı Modellerinin Kıyaslanmasına Yönelik Sonuçlar

Tez çalışmasının bu kısmında literatürde mevcut olan belli başlı yüzey altı saçılımı modellerinin güçlü ve zayıf yönleri kıyaslanmıştır ve tartışılmıştır. Tablo 7.1'den de görüleceği üzere literatürde mevcut olan belirli başlı yüzey altı saçılımı modelleri aşağıdaki kriterlere göre kıyaslanmıştır:

Kapsam: Eğer bir yüzey altı saçılımı modeli homojen, izotropik, anizotropik, yarı-homojen ve heterojen gibi bir çok yarı saydam malzeme tipini sunabiliyorsa bu skor o yüzey altı saçılımı modeli için yüksektir. Eğer bir yüzey altı saçılımı modeli yarı saydam malzemelerin ancak spesifik bir grubunu modelleyebiliyorsa, bu durumda bu skor bu yüzey altı saçılımı sunumu için düşük olacaktır.

Hız: Bu skor bir yüzey altı saçılımı modelinin mevcut donanımdaki görüntüleme zamanını sunmaktadır. Eğer bu skor düşükse, bu yüzey altı saçılımı modeli ile bir yarı saydam malzemeyi görüntülemek dakikalar mertebesinde sürmektedir. Yüksek skorlar ise yüzey altı saçılımı modelinin görüntüleri milisaniyeler mertebesinde görüntülediği anlamına gelmektedir.

GPU: Bu skor bir yüzey altı saçılımı sunumunun GPU'ya uyumluluğunu yansıtmaktadır. Şu anki GPU'lar bir çok GPU çekirdeğine ve kendine ait hafızalara sahip oldukları için, paralelleştirme, hafıza ve bant genişliğinden faydalanma, ve kod uyumluluğu GPU-tabanlı yöntemler için önemli konular olmaktadır. Eğer bir yüzey altı saçılımı sunumu mevcut GPU'ların bu kaynaklarından faydalanabilirse, bu durumda bu skor bu yüzey altı saçılımı sunumu için yüksek olacaktır.

Hafıza Tüketimi: Bu skor bir yüzey altı saçılımı modelinin bir sahne görüntülerken kullanması gereken hafıza miktarını sunmaktadır. Veriye dayalı yüzey altı saçılımı sunumları analitik yüzey altı saçılımı sunumları ile

kıyaslandıklarında daha çok veriye ihtiyaç duymaktadırlar. Dolayısıyla, bu skor veriye dayalı yüzey altı saçılımı modelleri için yüksek olacaktır. Bu skor yalnızca bir kaç parametrenin depolanmasını gerektiren yüzey altı saçılımı modelleri için ise düşük olacaktır.

Uygulanabilme: Bu skor bir yüzey altı saçılımı modelini yeniden uygulanmasının ne kadar karmaşık veya maliyetli olduğunu ölçer. Bir yüzey altı saçılımı modelini uygulamanın karmaşıklığı yüksek ise, bu durumda bu yüzey altı saçılımı modeli için bu skor düşük olacaktır.

Editing: Bu skor bir yüzey altı saçılımı modelini “edit”lemenin ne kadar kolay veya zor olduğunu ölçmektedir. Eğer bir yüzey altı saçılımı modeli kolaylıkla “edit”lenebiliyorsa, bu durumda bu yüzey altı saçılımı sunumu için bu skor yüksek olacaktır. Eğer bir yüzey altı saçılımı modeli “editing”e izin vermiyorsa bu durumda bu skor, o yüzey altı saçılımı modeli için düşük olacaktır.

Kıyaslamada kullanılan yıldız değerlendirmeleri bilgisayar grafiklerindeki uzmanlara ayrı ayrı sorularak elde edilmiştir. Daha sonra her bir uzmandan elde edilen yıldız değerlendirmelerinin ortalaması alınmıştır. Yıldız değerlendirmelerinin subjektif birer değer oldukları göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kıyaslamanın ana amacı her bir yüzey altı saçılımı sunumunun güçlü ve zayıf yönlerini kıyaslamaktır ve her bir yüzey altı saçılımı sunumunun nasıl bir katkı sağladığını göstermektir.

Tez çalışmasının bu kısmında, yüzey altı saçılımı modelleri ve ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verileri sınıflandırılmıştır. Yarı saydam malzemelerden elde edilen çeşitli ölçümlenmiş veriler ve çeşitli yüzey altı saçılımı modelleri incelenmiştir. Bunun dışında, literatürde mevcut olan belli başlı yüzey altı saçılımı sunumları kapsam, GPU uyumluluğu, görüntüleme zamanları, hafıza gereksinimi, yeniden uygulanabilme ve “editing” yeteneklerine göre kıyaslanmıştır. Tez çalışmasının bu kısmında ayrıca, Jensen et al.’ın (2001) iki kutuplu yayılma yaklaşımından esinlenerek geliştirilen en önemli yüzey altı saçılımı sunumları tarihsel olarak listelenmiştir (Ek Açıklamalar-A’ya bakınız). Bu tarihsel listeleme, GPU donanımındaki büyük gelişim sayesinde, yüzey altı saçılımı sunumlarının gerçek zamanlı görüntüleme ve “editing”inin mümkün olduğunu göstermektedir.

Buna göre, yüzey altı saçılımı sunumları üzerine yapılan çalışmaların, yüzey altı saçılımı modellerinin gerçek zamanlı görüntülenmesine ve gerçek zamanlı pa-

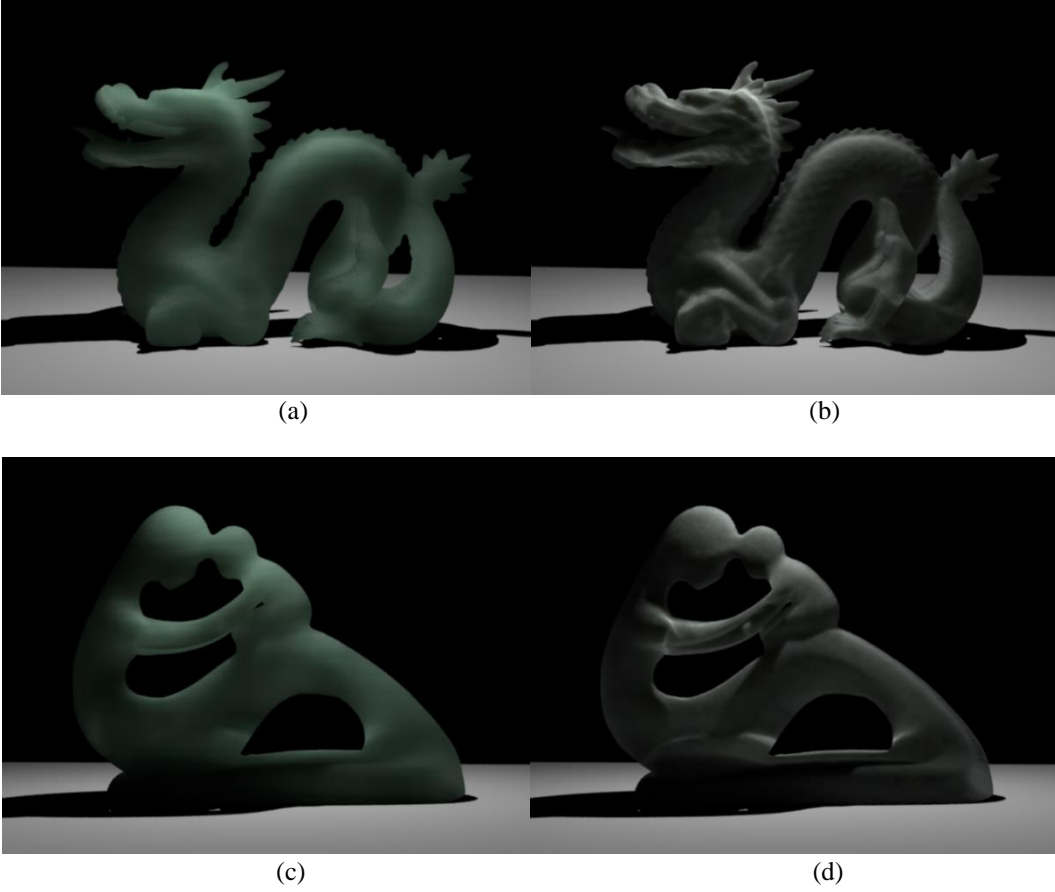
Tablo 7.1. İyi bilinen çeşitli yüzey altı saçılımı modellerinin kıyaslanması.

Yüzey Sunumu	Altı Saçılımı	Kapsam	Hız	GPU	Hafıza Ger.	Uygulanab.	Editing
Jensen et al. (2001)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★☆☆☆☆	★★★★★	★★★★★
Jensen and Buhler (2002)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★☆☆☆☆	★★★★★	★★★★★
Borshukov and Lewis (2003)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★☆☆☆☆	★★★★★
Fusch et al. (2005)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★
Donner and Jensen (2005)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★☆☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★
Wang et al. (2005)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★
Mertens et al. (2005)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★★★★	★★★★★
Peers et al. (2006)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★
d'Eon et al. (2007)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★
Xu et al. (2007)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★★★★
Donner et al. (2008)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★
Wang et al. (2008)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★
Ghosh et al. (2008)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★
Donner et al. (2009)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★
Song et al. (2009)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★
Jakob et al. (2010)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★☆☆☆☆	★★★★★	★★★★★
d'Eon and Irving (2011)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★★★
Munoz et al. (2011)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★★★★	★★★★★
Jimenez et al. (2009; 2010a; 2010b; 2012)	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★☆☆☆	★★★★★	★★★★★

rametre “editing”ine müsaade edecek şekilde devam edeceği düşünülmektedir. Ayrıca, “diffuse” yüzey altı yansıma fonksiyonu $R_d(x_i, x_o)$ 'nin geniş bir malzeme çeşidi için ölçümlene ve sunumunun da yine yüzey altı saçılımı sunumuna önemli bir katkı olacağı düşünülmektedir.

7.2 Tucker Faktörizasyonuna Dayalı Yüzey Altı Saçılımı Modeline Ait Sonuçlar

İlk olarak, elde edilen sonuçları görselleştirmek için Bölüm 6’da anlatılan görüntüleme algoritması MITSUBA görüntüleyicisi üzerinde uygulanmıştır. Daha sonra, tez çalışması kapsamında geliştirilen Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu gerçek dünyada mevcut olan çeşitli heterojen yüzey altı saçılımına sahip malzemede doğrulanmıştır. Tablo 7.2, Tucker tabanlı model ile sunulan heterojen yarı saydam malzemeler hakkında bazı istatistikler sunmaktadır. Örneğin, Şekil 7.1’de yüzey altı saçılımı modelimiz ile mermer (yakın çekim) ve yoğun damarlı mermer malzemelerini sunmak için model parametreleri $T = 15$ ve $P = 4$ seçilmiştir. Şekil 7.1’den de görüleceği üzere, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı modelimiz herhangi bir geometri üzerinde kullanılabilir ve heterojen yüzey altı saçılımı etkilerini görsel olarak doğru bir şekilde sunmaktadır. Bu sonuçlar ay-



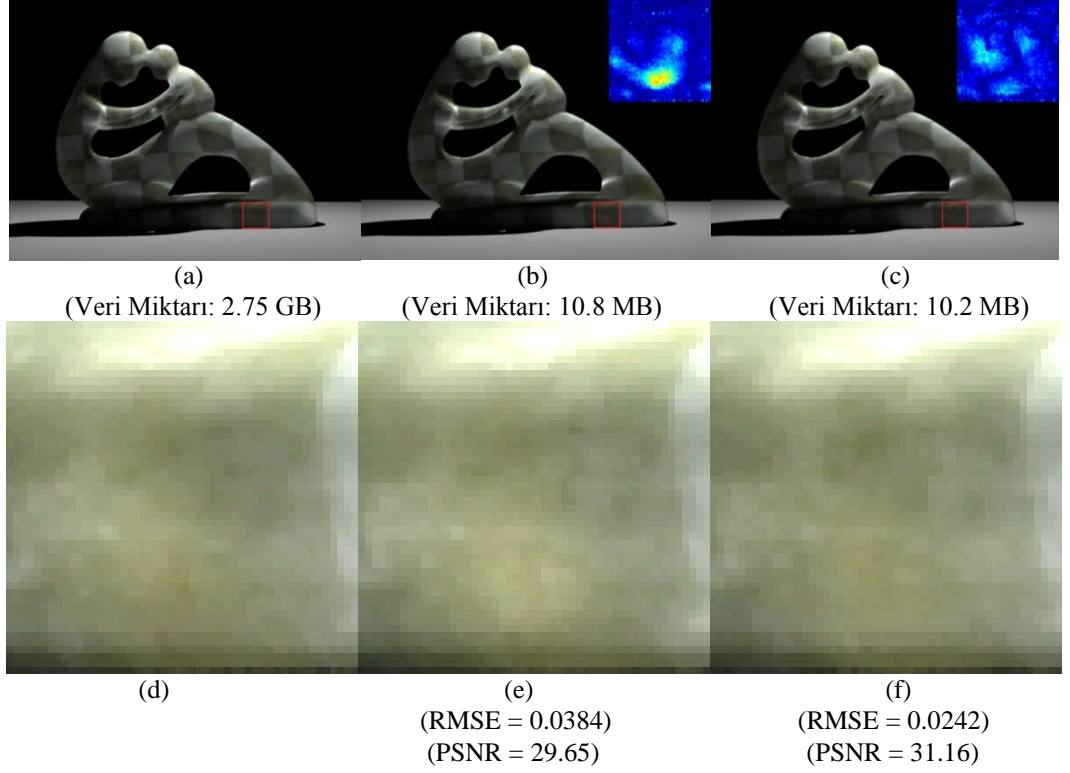
Şekil 7.1. Tucker faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli farklı geometriler üzerinde kullanılabilir. Bu malzemelerde model parametreleri $T = 15$ ve $P = 4$ seçilmiştir. (a)-(c) mermer (yakın çekim) malzemesi, (b)-(d) yoğun damarlı mermer malzemesidir.

Tablo 7.2. Tucker tabanlı modele ait tipik olarak seçilmiş model parametrelerine (T ve P) göre elde edilmiş bazı istatistikler.

Örnek Malzeme	Original Veri Büyüklüğü	# T	# P	Model Verisi Büyüklüğü	CR	RMSE
Satranç tahtası (4×4)	2.74 Gb	15	7	24.11 Mb	1/116	0.0102
Satranç tahtası (8×8)	2.75 Gb	10	4	10.2 Mb	1/276	0.0242
Mermer (yakın çekim)	6.0 Gb	15	4	4.19 Mb	1/1466	0.0072
Yoğun damarlı mermer	4.92 Gb	15	4	11.0 Mb	1/458	0.0152

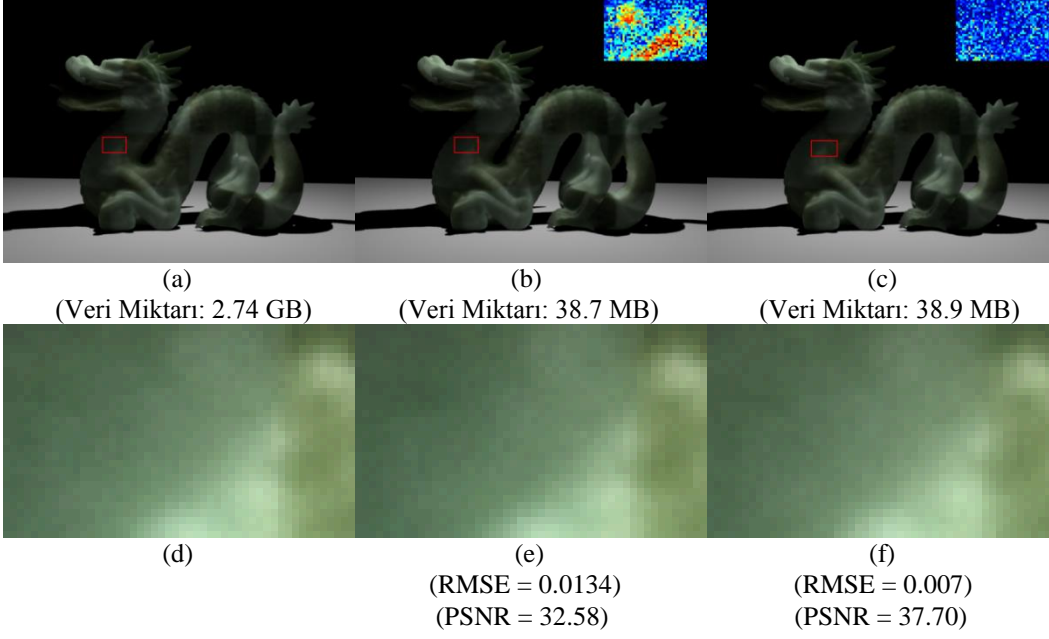
rica şunu da göstermektedir; modelimiz görsel doğruluğu sağlarken yüksek miktarda sıkıştırma da sağlamaktadır.

Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı modeli ayrıca Peers et al.'in yüzey altı saçılımı modeli (2006) ile bazı heterojen yarı saydam malzemelerde kıyaslanmıştır. Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'de ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisinin, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin ve Peers et al.'in yüzey altı saçılımı modelinin yeni geometriler üzerinde görüntülenmesine dayalı kıyaslamalar bulun-



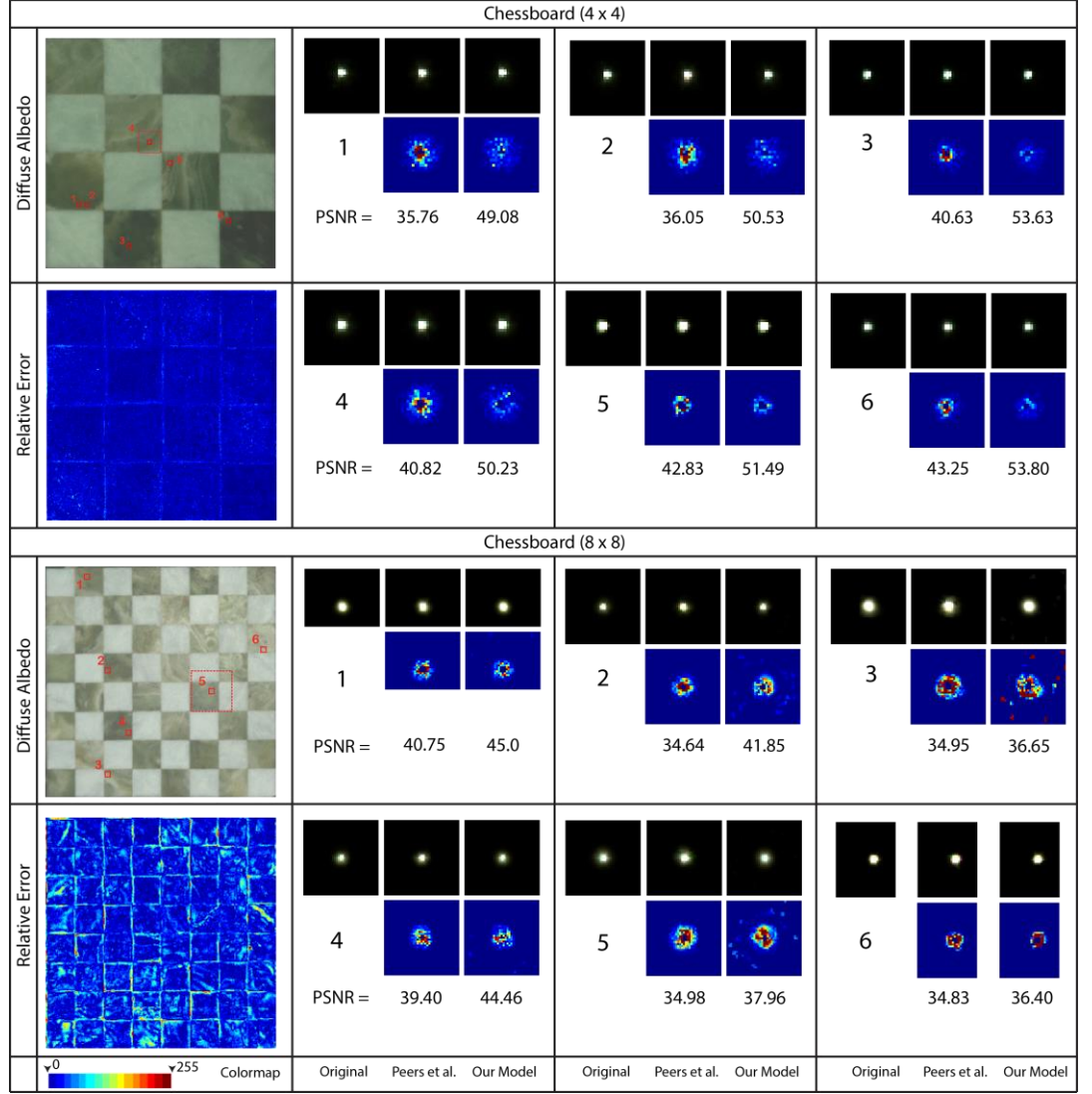
Şekil 7.2. Spot ışıklandırma altında heykel objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen mermer satranç tahtası (8×8) verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Peers et al.'ın (2006) yüzey altı saçılımı modeli, (c) Tucker faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d), (e) ve (f) görüntülerde işaretlenen bölgelerin büyütülmüş hallerini göstermektedir. Her bir görüntünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 5$ ile ölçeklenmiştir.

maktadır. Hem Şekil 7.2 hem Şekil 7.3'de görüntüler spot ışıklandırma altında tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Bu sayede yüzey altı saçılımı etkileri daha iyi vurgulanmaktadır. Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'de bütün yüzey altı saçılımı sunumlarının depolama gereksinimleri belirtilmiştir. Tucker tabanlı modelin parametreleri, Şekil 7.2'de satranç tahtası (8×8) malzemesi için $T = 10$ ve $P = 4$ seçilmiştir. Şekil 7.3'de ise satranç tahtası (4×4) malzemesi için $T = 40$ ve $P = 7$ seçilmiştir. Hem Şekil 7.2'de hem Şekil 7.3'de Ortalama Karekök Hata (Root-Mean-Square Error - RMSE) ve Pik Sinyal Gürültü Oranı (Peak Signal-to-Noise Ratio - PSNR) değerleri (Richardson, 2002) belirtilmiştir, bazı bölgeler daha detaylıca gösterilmiştir. Ayrıca detaylıca gösterilen bölgelerin fark görüntüleri alınarak sunumlar arasındaki farklar daha iyi vurgulanmıştır. Bütün bu sonuçlara göre, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunun yaklaşık olarak aynı sıkıştırma oranlarında heterojen yarı saydam malzemeleri daha doğru bir şekilde sunduğu söylenebilir.



Şekil 7.3. Spot ışıklandırma altında ejderha objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen mermer satranç tahtası (4×4) verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Peers et al.'ın (2006) yüzey altı saçılımı modeli, (c) Tucker faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d), (e) ve (f) görüntülerde işaretlenen bölgelerin büyütülmüş hallerini göstermektedir. Her bir görüntünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 20$ ile ölçeklenmiştir.

Bunun dışında, Şekil 7.4'de ölçümlenmiş verinin, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin ve Peers et al.'ın yüzey altı saçılımı modelinin tepki görüntüleri kıyaslanmıştır. Şekil 7.4'deki noktalı kareler yaklaşık olarak çekirdek büyüklüğüne karşılık gelmektedir, ve tepki görüntülerinin yaklaşık olarak büyüklüğüne karşılık gelmektedir. Şekil 7.4'ün diğer bir önemli hedefi ise, Peers et al.'ın yüzey altı saçılımı modeli ile Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı modelini yaklaşık olarak aynı sıkıştırma oranlarında kıyaslamaktır. Dolayısıyla, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunun parametreleri satranç tahtası (4×4) malzemesi için $T = 40$ ve $P = 7$, satranç tahtası (8×8) malzemesi için $T = 10$ ve $P = 7$ seçilmiştir. Bu durumda, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu satranç tahtası (4×4) malzemesi ve satranç tahtası (8×8) malzemesi için 38.9 Mb ve 13.6 Mb veriye ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, model hataları ise RMSE cinsinden 0.007 ve 0.0212'dir. Diğer yandan, Peers ve arkadaşlarının sunumu satranç tahtası (4×4) malzemesi ve satranç tahtası (8×8) malzemesi için 38.7 Mb ve 10.8 Mb veriye ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, Peers ve arkadaşlarının modelinin hataları ise RMSE cinsinden 0.0134 ve 0.0384'dür.



Şekil 7.4. Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Peers et al.'ın sunumu ile, Tucker tabanlı sunumun kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, Tucker tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 20$ ile ölçeklendirilmiştir.

Şekil 7.4’de ayrıca görsel kaliteyi sayısal olarak göstermek için PSNR değerleri de belirtilmiştir. Kıyaslanan tepkimelerin lokasyonları, karşılık gelen tepki görüntüleri ve fark görüntüleri de Şekil 7.4’de bulunmaktadır. Bu sonuçlara göre, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin yaklaşık olarak aynı sıkıştırma oranlarında heterojen yüzey altı saçılımını daha doğru bir şekilde sunduğu söylenebilir. Dolayısıyla, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu daha etkin bir sunumdur.

Tablo 7.3. Üst tablo saniyeler mertebesinde yüzey altı saçılımı sunumlarının ortalama “albedo” hesaplama zamanlarını göstermektedir. Alt tablo ise yüzey altı saçılımı sunumlarının bu hesaplama sırasındaki depolama gereksinimini MB cinsinden göstermektedir. Her iki tabloda da yüzey altı saçılımı modelleri aynı hata değerlerini (RMSE) verecek şekilde seçilmişlerdir.

Yüzey Altı Saçılımı Sunumu	Satranç tahtası (4 × 4)	Satranç tahtası (8 × 8)
Peers et al.	3.756	1.135
Tucker tabanlı model	0.0427	0.0314

Yüzey Altı Saçılımı Sunumu	Satranç tahtası (4 × 4)	Satranç tahtası (8 × 8)
Peers et al.	38.7 Mb	10.8 Mb
Tucker tabanlı model	21.1 Mb	8.33 Mb

Şekil 7.2, Şekil 7.3 ve Şekil 7.4’den görüldüğü üzere, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunun diğer bir avantajı ise modelleme hatalarının düzgün (uniform) olarak dağılım göstermesidir. Bu özellik bir yüzey altı saçılımı sunumu için istenen bir özelliktir. Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu ayrıca ölçümleme veya kalibrasyon sırasında oluşan pikteki herhangi bir kaymayı da gidermektedir. Ek olarak, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu yaklaşık olarak aynı sıkıştırma oranlarında Song et al.’ın (2009) heterojen yüzey altı saçılımı sunumundan (SubEdit) daha doğru bir şekilde yarı saydam malzemeleri sunmaktadır. Çünkü Song et al. kendi çalışmalarında sunumlarının aynı sıkıştırma oranlarında Peers et al.’ın sunumuna göre daha fazla modelleme hatası (%2 – %7) verdiğini belirtmişlerdir.

Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı modeli değiştirilebilir iki parametreye sahiptir: T ve P . Buna göre, Peers et al.’ın (2006) modeli ile kıyaslandığında Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin daha esnek olduğu söylenebilir. Yüksek T ve P değerleri daha yüksek miktarda yaklaşım doğruluğu ve daha yüksek miktarda veri miktarı depolama gerekliliği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı modeli film üretimi görüntülemesi için daha yüksek T ve P değerleri ile kullanılabilir ($T \geq 40$). Diğer yandan, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı modeli ile ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisi düşük T ve P değerleri ile de görsel olarak tatmin edici bir şekilde sunulabilir. Bu durum ayrıca Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunun doğruluk ve kompaktlık arasındaki esnekliğini göstermektedir.

Son olarak, Tablo 7.3’de yüzey altı saçılımı modellerinin hesaplama zamanları üzerine bir kıyaslama bulunmaktadır. Bu kıyaslama sırasında her iki sunumun da modelleme hatalarının (RMSE) yaklaşık olarak aynı olması sağlanmıştır. Dolayısıyla, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunun

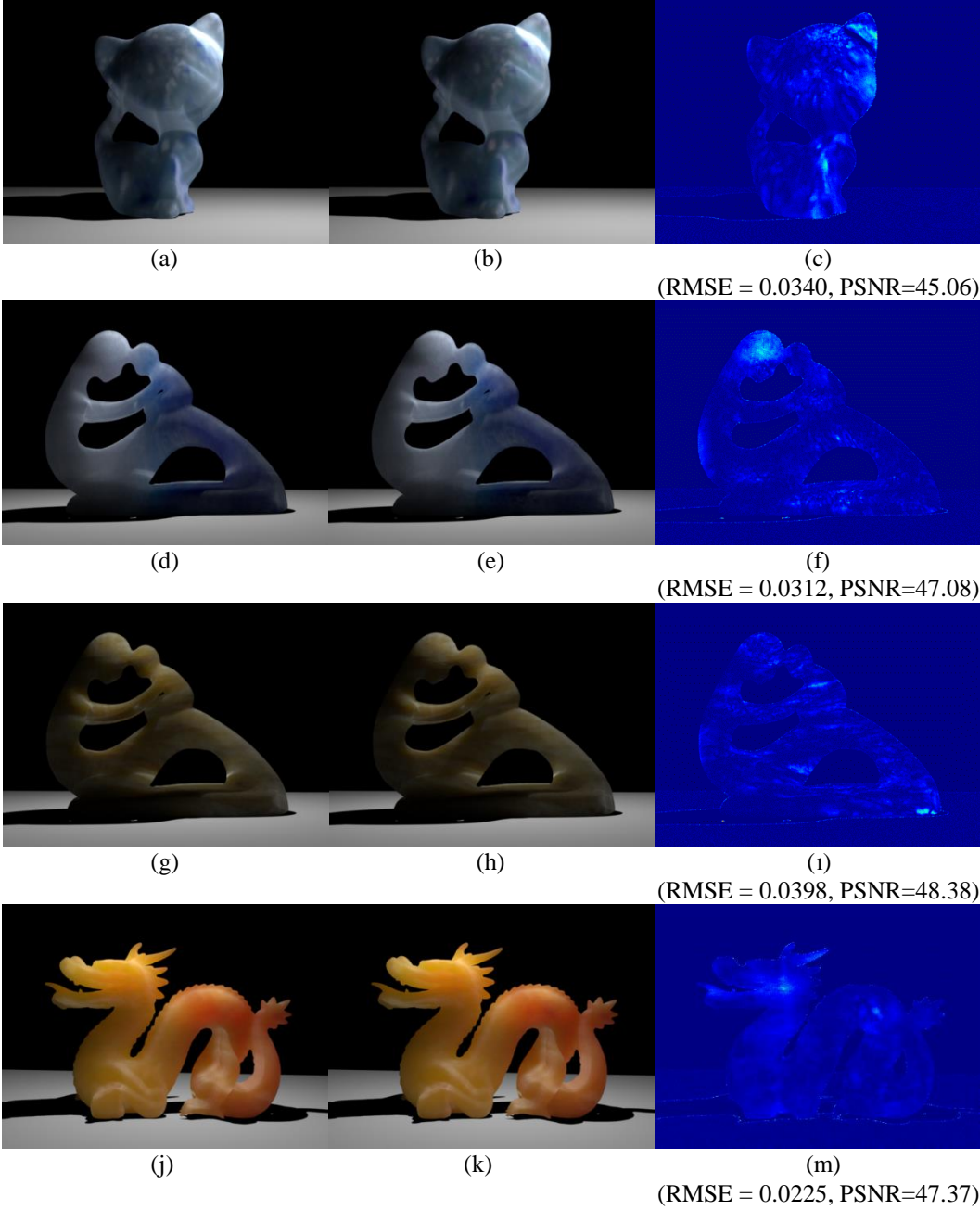
parametreleri satranç tahtası (4×4) malzemesi için $T = 10$ ve $P = 7$, satranç tahtası (8×8) malzemesi için $T = 5$ ve $P = 4$ seçilmiştir. Bu durumda, kıyaslanan yüzey altı saçılımı sunumlarının veri saklama miktarları ve ortalama “albedo” hesaplama zamanları Tablo 7.3’de bulunabilir. Hesaplama zamanları, 48 GB RAM’e ve Dual Intel Xeon X5650 CPU @ 2.67 GHz özelliklerine sahip bir grafik iş istasyonunda ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu aynı RMSE değerlerinde Peers et al.’ın modeline göre daha hızlı ($36 \times - 88 \times$) ve daha kompaktır ($1.30 \times - 1.83 \times$). Bu durum, ayrıca Tucker tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunu gerçek zamanlı görüntüleme uygulamaları için daha uygun kılmaktadır.

7.3 SVD Yöntemine Dayalı Yüzey Altı Saçılımı Modeline Ait Sonuçlar

Yüzey altı saçılımı sunumlarını ve elde edilen sonuçları görselleştirmek için Bölüm 6’da anlatılan görüntüleme algoritması MITSUBA görüntüleyicisi üzerinde uygulanmıştır. Daha sonra, tez çalışması kapsamında geliştirilen SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu gerçek dünyada mevcut olan çeşitli heterojen yüzey altı saçılımına sahip malzemelerde doğrulanmıştır. Tablo 7.4, SVD tabanlı model ile sunulan heterojen yarı saydam malzemeler hakkında bazı istatistikler sunmaktadır. Şekil 7.5 ve Şekil 7.6’da ise Tablo 7.4’deki model parametreleri kullanılarak SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeli görüntülenmiştir ve ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisi kullanılarak elde edilen görüntüler ile görsel olarak kıyaslanmıştır. Ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisi görüntülenirken veriler üzerinde interpolasyon uygulanmıştır. İnterpolasyon $R_d'''(x_i, d)$ hesaplanırken, $h_j(d)$ vektörünün d değerleri arasında iki çizgili doğrusal interpolasyon (bilinear interpolation) kullanılarak yapılmıştır. Bu sayede görüntüleme sırasındaki hesaplama maliyeti de düşürülmüştür.

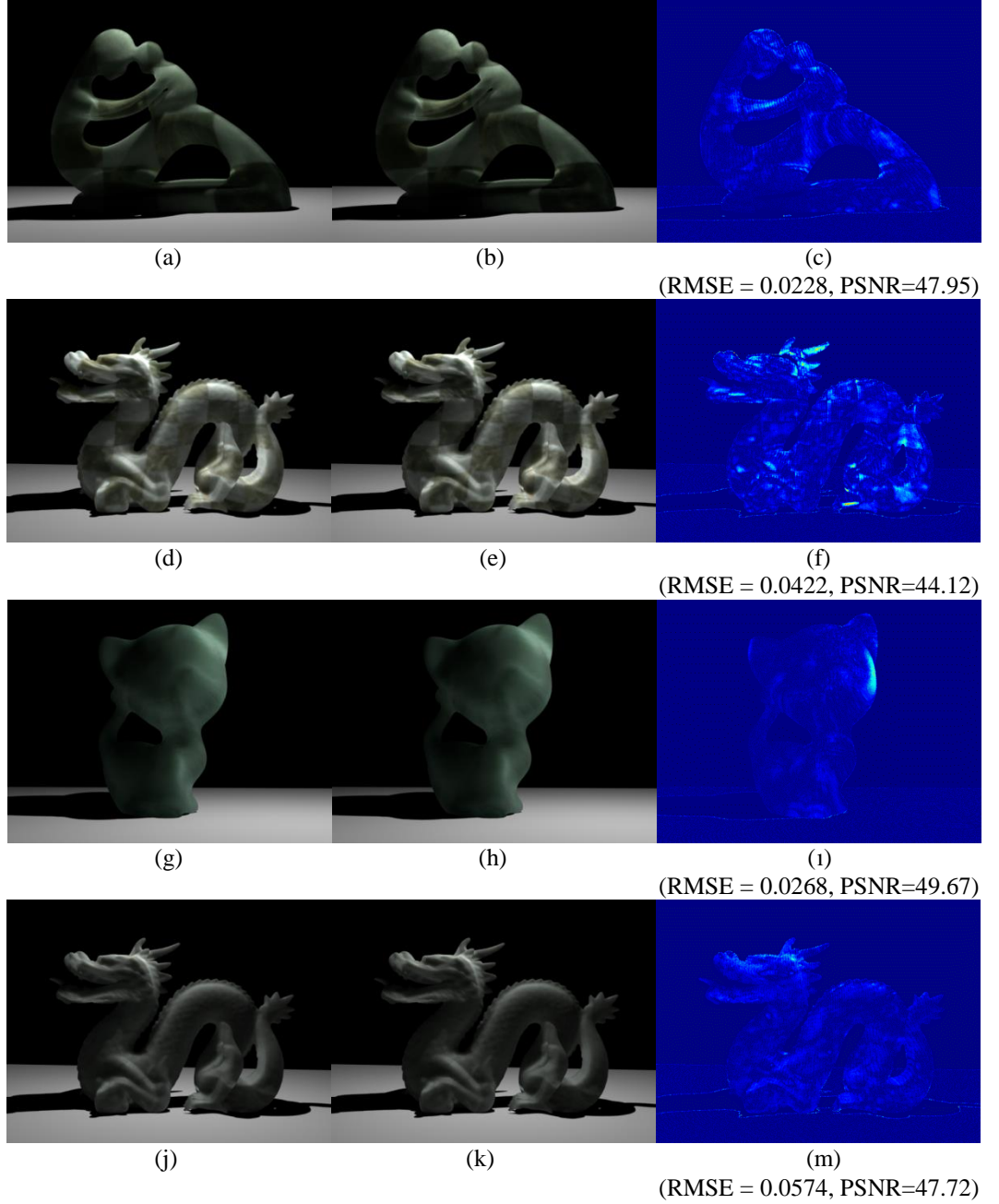
Tablo 7.4. SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeline ait tipik olarak seçilmiş model parametresine (S) ve optimizasyon sonucu elde edilen model parametrelerine (A ve B) göre elde edilmiş bazı istatistikler.

Örnek Malzeme	Orginal Veri Büyüklüğü	#S	A	B	Model Verisi Büyüklüğü	CR	RMSE
Yapay taş	327 Mb	5	1000	1	1.48 Mb	1/221	0.0340
Mavi mum	572 Mb	5	100	1	2.48 Mb	1/231	0.0312
Yeşim taşı	1.85 Gb	5	1000	1	7.88 Mb	1/240	0.0398
Sarı mum	421 Mb	5	100	1	1.56 Mb	1/270	0.0225
Satranç tahtası (4×4)	2.60 Gb	5	100	1	8.96 Mb	1/297	0.0228
Satranç tahtası (8×8)	1.67 Gb	5	1000	1	5.82 Mb	1/294	0.0422
Mermer (yakın çekim)	570 Mb	5	10	1	2.05 Mb	1/278	0.0268
Yoğun damarlı mermer	1.52 Gb	5	30	1	5.32 Mb	1/293	0.0574



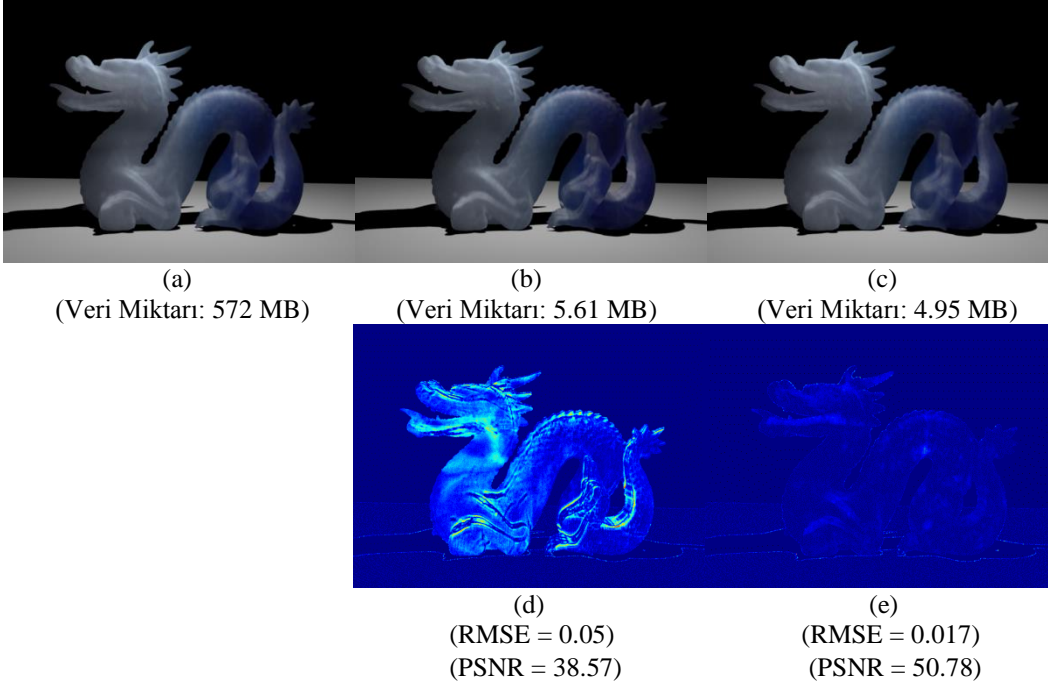
Şekil 7.5. Spot ışıklandırma altında kedi yavrusu, heykel ve ejderha objeleri kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen yapay taş verisi , (d) heterojen mavi mum verisi, (g) heterojen yeşim taşı verisi ve (j) heterojen sarı mum verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü). (b), (e), (h) ve (k) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntülerdir. (c), (f), (i) ve (m) SVD faktörizasyonu ile referans görüntü arasındaki fark görüntüleridir. Fark görüntüleri altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir.

Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'dan da görüleceği üzere, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelimiz herhangi bir geometri üzerinde kullanılabilir ve heterojen yüzey altı saçılımı etkilerini görsel olarak doğru bir şekilde sunmakta-



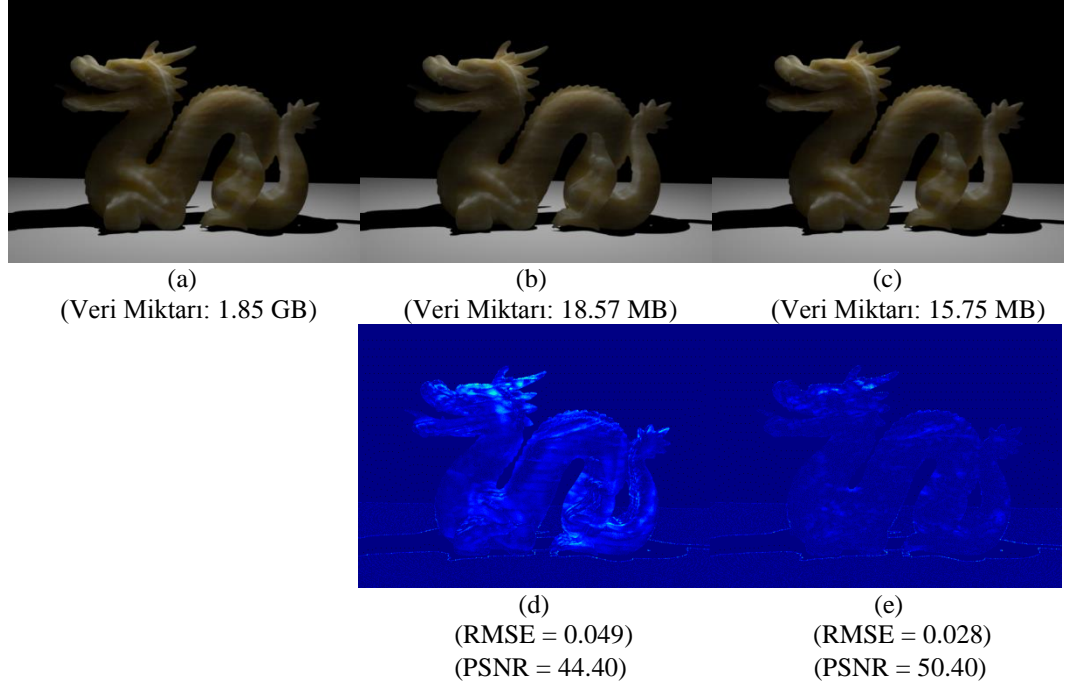
Şekil 7.6. Spot ışıklandırma altında kedi yavrusu, heykel ve ejderha objeleri kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen satranç tahtası (4×4) verisi, (d) heterojen satranç tahtası (8×8) verisi, (g) heterojen mermer (yakın çekim) verisi ve (j) heterojen yoğun damarlı mermer verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü). (b), (e), (h) ve (k) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntülerdir. (c), (f), (i) ve (m) SVD faktörizasyonu ile referans görüntü arasındaki fark görüntüleridir. Fark görüntüleri altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir.

dır. Bu sonuçlar ayrıca şunu da göstermektedir; modelimiz görsel doğruluğu sağlarken ayrıca yüksek miktarda sıkıştırma da sağlamaktadır.



Şekil 7.7. Spot ışıklandırma altında ejderha objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen mavi mum verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Song et al.'ın (2009) yüzey altı saçılımı modeli, (c) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d) ve (e) referans görüntü ve model görüntüleri arasındaki fark görüntülerini göstermektedir. Her bir fark görüntüsünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir.

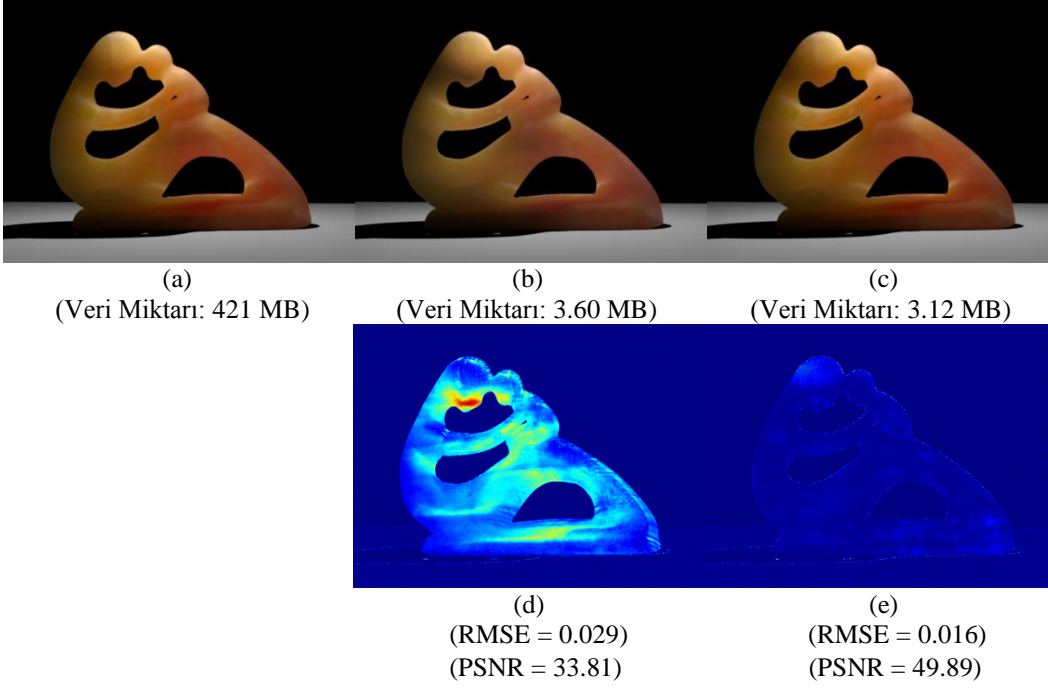
SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeli ayrıca Song et al.'ın (2009) yüzey altı saçılımı modeli (SubEdit) ile bazı heterojen yarı saydam malzemelerde kıyaslanmıştır. Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisinin, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin ve Song et al.'ın yüzey altı saçılımı modelinin (SubEdit) yeni geometriler üzerinde görüntülenmesine dayalı kıyaslamalar bulunmaktadır. Görüntüler spot ışıklandırma altında tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Bu sayede yüzey altı saçılımı etkileri daha iyi vurgulanmaktadır. Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da bütün yüzey altı saçılımı sunumlarının depolama gereksinimleri belirtilmiştir. SVD tabanlı modelin parametreleri, Şekil 7.7'de mavi mum malzemesi için $S = 10$, $A = 100$, $B = 1$; Şekil 7.8'de yeşim taşı malzemesi için $S = 10$, $A = 1000$, $B = 1$; Şekil 7.9'de sarı mum malzemesi için $S = 10$, $A = 100$, $B = 1$ ve Şekil 7.10'da satranç tahtası (4×4) malzemesi için $S = 10$, $A = 100$, $B = 1$ olarak belirlenmiştir. Şekillerde ayrıca RMSE ve PSNR değerleri (Richardson, 2002) belirtilmiştir, fark görüntü-



Şekil 7.8. Spot ışıklandırma altında ejderha objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen yeşim taşı verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Song et al.'ın (2009) yüzey altı saçılımı modeli, (c) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d) ve (e) referans görüntü ve model görüntüleri arasındaki fark görüntülerini göstermektedir. Her bir fark görüntüsünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir.

leri alınarak sunumlar arasındaki farklar daha iyi vurgulanmıştır. Bütün bu sonuçlara göre, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunun yaklaşık olarak aynı sıkıştırma oranlarında heterojen yarı saydam malzemeleri daha doğru bir şekilde sunduğu söylenebilir.

Bunun dışında, Şekil 7.11, Şekil 7.12, Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'de ölçümlenmiş verinin, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin ve Song et al.'ın yüzey altı saçılımı modelinin (SubEdit) tepki görüntüleri kıyaslanmıştır. Şekil 7.11, Şekil 7.12, Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'deki noktali kareler yaklaşık olarak çekirdek büyüklüğüne karşılık gelmektedir ve tepki görüntülerinin yaklaşık olarak büyüklüğüne karşılık gelmektedir. Şekil 7.11, Şekil 7.12, Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'ün diğer bir önemli hedefi ise, Song et al.'ın yüzey altı saçılımı modeli ile SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelini yaklaşık olarak aynı sıkıştırma oranlarında kıyaslamaktır. Dolayısıyla, SVD tabanlı modelin parametreleri, Şekil 7.11'de mavi mum malzemesi için $S = 10$, $A = 100$, $B = 1$; Şekil 7.12'de yeşim taşı malzemesi için $S = 10$, $A = 1000$, $B = 1$; Şekil 7.13'de sarı mum

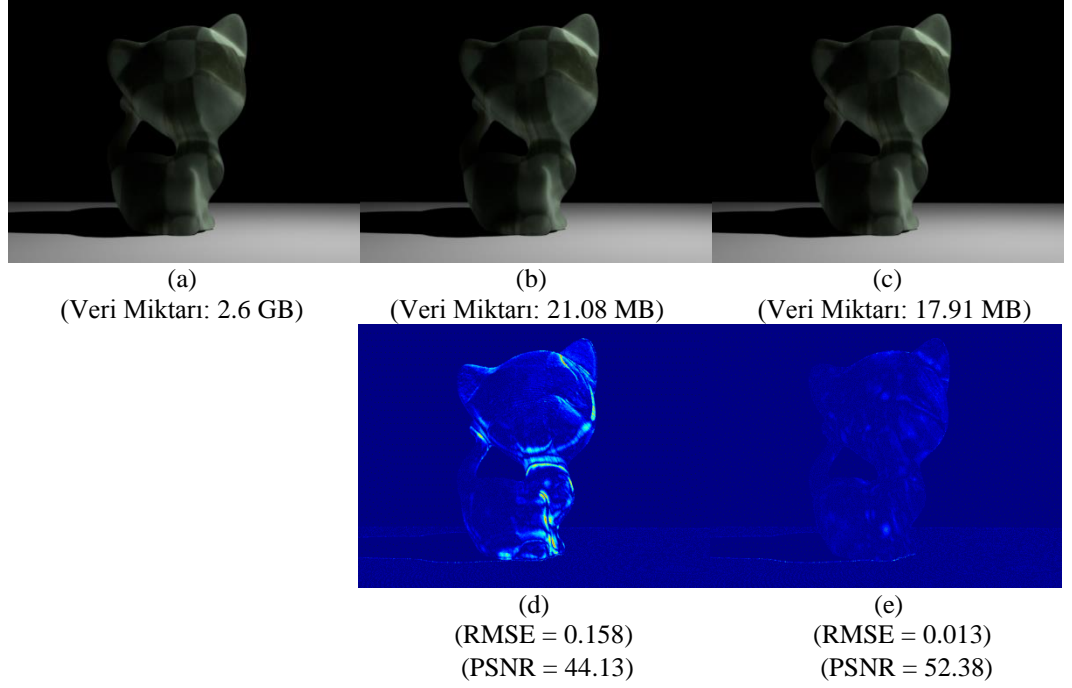


Şekil 7.9. Spot ışıklandırma altında heykel objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen sarı mum verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Song et al.'ın (2009) yüzey altı saçılımı modeli, (c) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d) ve (e) referans görüntü ve model görüntüleri arasındaki fark görüntülerini göstermektedir. Her bir fark görüntüsünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir.

Tablo 7.5. SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeline ait tipik olarak seçilmiş model parametresine (S) ve optimizasyon sonucu elde edilen model parametrelerine (A ve B) göre elde edilmiş bazı istatistikler. Bu tablo ayrıca yaklaşık olarak aynı depolama gereksinimlerine göre SubEdit yöntemine ait bazı istatistiklerde sunmaktadır.

Örnek Malzeme	Original Veri Büyüklüğü	(# S,A,B)	SVD Modeli Verisi Büyüklüğü	SVD RMSE	SubEdit Modeli Verisi Büyüklüğü	SubEdit RMSE
Mavi mum	572 Mb	(10, 100, 1)	4.95 Mb	0.017	5.61 Mb	0.05
Yeşim taşı	1.85 Gb	(10, 1000, 1)	15.75 Mb	0.028	18.57 Mb	0.049
Sarı mum	421 Mb	(10, 100, 1)	3.12 Mb	0.016	3.60 Mb	0.029
Satranç tahtası (4 \times 4)	2.60 Gb	(10, 100, 1)	17.91 Mb	0.013	21.08 Mb	0.158

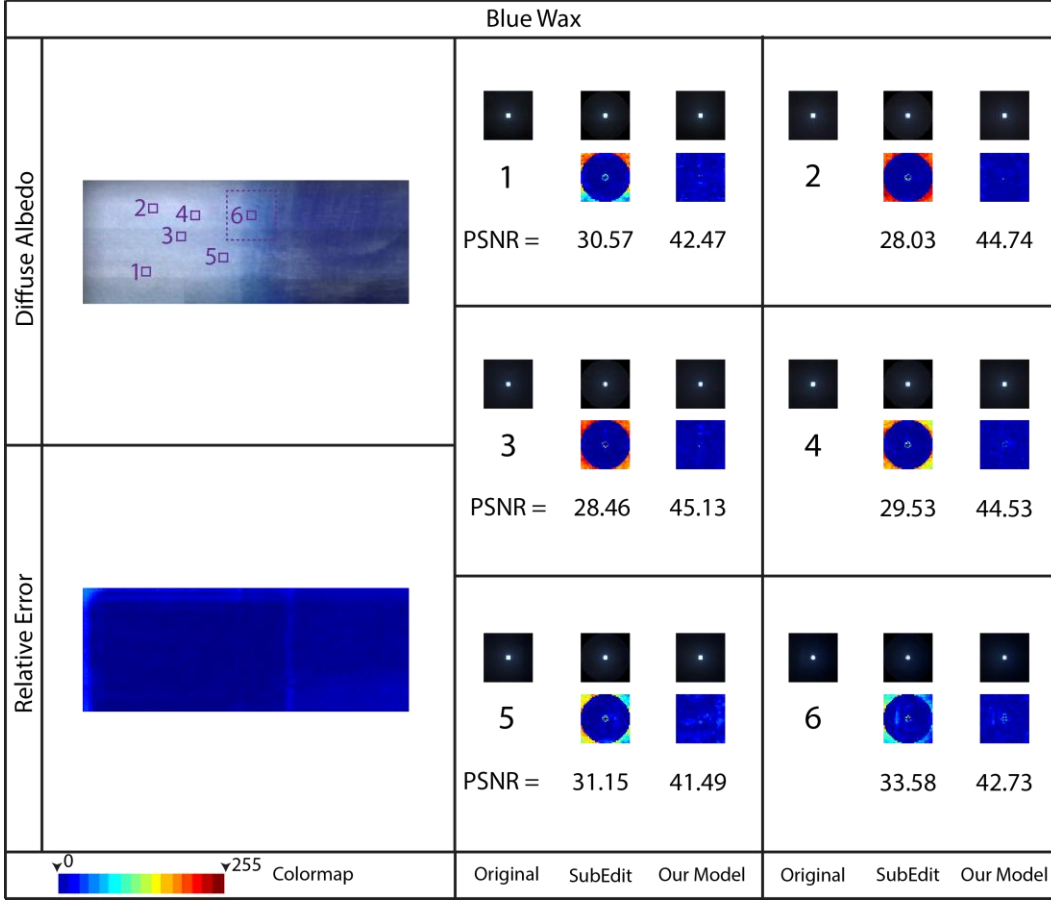
malzemesi için $S = 10, A = 100, B = 1$ ve Şekil 7.14'de satranç tahtası (4 \times 4) malzemesi için $S = 10, A = 100, B = 1$ olarak belirlenmiştir. Bu durumda, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu ile Song et al.'ın sunumlarının ihtiyaç duydukları veri miktarı ve model hataları ise Tablo 7.5'de bulunmaktadır. Şekil 7.11, Şekil 7.12, Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'de ayrıca kıyaslanan tepkimelerin lokasyonları, karşılık gelen tepki görüntüleri ve fark görüntüleri de bulunmakta-



Şekil 7.10. Spot ışıklandırma altında kedi yavrusu objesi kullanılarak yapılan görsel kıyaslama. (a) Heterojen satranç tahtası (4×4) verisi tam Monte Carlo yol gezinimi algoritması ile görüntülenmiştir (Referans görüntü); (b) Song et al.'ın (2009) yüzey altı saçılımı modeli, (c) SVD faktörizasyonuna dayalı yüzey altı saçılımı modeli kullanılarak elde edilen görüntüler. (d) ve (e) referans görüntü ve model görüntüleri arasındaki fark görüntülerini göstermektedir. Her bir fark görüntüsünün altında RMSE değerleri (düşük olması daha iyidir) ve PSNR değerleri (büyük olması daha iyidir) bulunmaktadır. Daha iyi bir kıyaslama için fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklenmiştir.

dır. Bu sonuçlara göre, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin yaklaşık olarak aynı sıkıştırma oranlarında heterojen yüzey altı saçılımını daha doğru bir şekilde sunduğu söylenebilir. Dolayısıyla, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu daha etkin bir sunumdur.

Bundan başka, Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da ölçümlenmiş verinin, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin ve Peers et al.'ın (2006) yüzey altı saçılımı modelinin tepki görüntüleri kıyaslanmıştır. Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'daki noktalı kareler yaklaşık olarak çekirdek büyüklüğüne karşılık gelmektedir, ve tepki görüntülerinin yaklaşık olarak büyüklüğüne karşılık gelmektedir. Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'nın diğer bir önemli hedefi ise, Peers et al.'ın yüzey altı saçılımı modeli ile SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelini yaklaşık olarak aynı sıkıştırma oranlarında kıyaslamaktır. Dolayısıyla, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunun parametreleri satranç tahtası (4×4) malzemesi için $S = 20$, $A = 100$, $B = 1$; satranç tahtası (8×8) malzemesi için $S = 10$, $A = 1000$, $B = 1$; seçilmiştir. Bu durumda, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu satranç tahtası



Şekil 7.11. Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Song et al.'ın sunumu (SubEdit) ile, SVD tabanlı sunumun mavi mum malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklendirilmiştir.

(4×4) malzemesi ve satranç tahtası (8×8) malzemesi için 35.82 Mb ve 11.63 Mb veriye ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, model hataları ise RMSE cinsinden 0.0066 ve 0.0197'dir. Diğer yandan, Peers et al.'ın sunumu satranç tahtası (4×4) malzemesi ve satranç tahtası (8×8) malzemesi için 38.7 Mb ve 10.8 Mb veriye ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, Peers et al.'ın modelinin hataları ise RMSE cinsinden 0.0138 ve 0.0492'dür. Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da ayrıca görsel kaliteyi sayısal olarak göstermek için PSNR değerleri de belirtilmiştir. Kıyaslanan tepkimelerin lokasyonları, karşılık gelen tepki görüntüleri ve fark görüntüleri de Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da bulunmaktadır. Bu sonuçlara göre, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin yaklaşık olarak aynı sıkıştırma oranlarında heterojen yüzey altı saçılımını Peers et al.'ın modeline göre daha doğru bir şekilde sunduğu

söylenbilir. Dolayısıyla, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu daha etkin bir sunumdur.

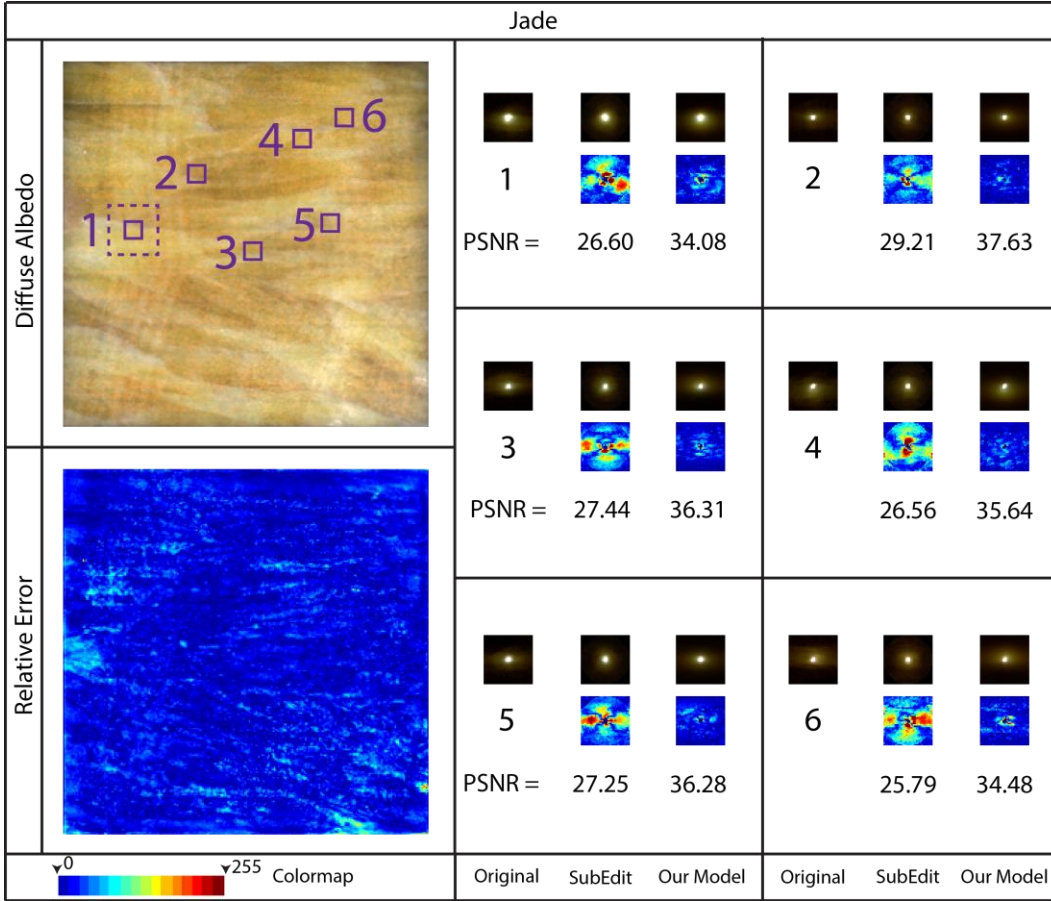
Şekil 7.11, Şekil 7.12, Şekil 7.13, Şekil 7.14, Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'dan görüldüğü üzere, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunun diğer bir avantajı ise modelleme hatalarının düzgün olarak dağılım göstermesidir. Bu özellik bir yüzey altı saçılımı sunumu için istenen bir özelliktir. SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu ayrıca negatif değerler üretmemektedir. Bu özellikte yine fiziksel tabanlı bir yüzey altı saçılımı modeli için istenen bir özelliktir.

SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeli değiştirilebilir üç parametreye sahiptir: S , A ve B . Burada, yüksek S değerleri daha yüksek miktarda yaklaşım doğruluğu ve daha yüksek miktarda veri miktarı depolama gerekliliği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeli film üretimi görüntülemesi için daha yüksek S değerleri ile kullanılabilir ($S \geq 20$). Diğer yandan, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeli ile ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisi düşük S değerleri ile de ($S \leq 5$) görsel olarak tatmin edici bir şekilde sunulabilir. Bu durum ayrıca SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunun doğruluk ve kompaktlık arasındaki esnekliğini göstermektedir. SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin diğer iki parametresi olan A ve B ise veri modellemesi sırasında tahminlenmektedir. Bu parametreler, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin kompaktlığına katkıda bulunmaktadır ancak hesaplama zamanına herhangi bir etkileri yoktur. Şekil 7.17'de, SVD tabanlı yüzey altı sunumunun değişen model parametresi S 'ye göre görüntüleme zamanlarını göstermektedir. Şekil 7.17'den görüleceği üzere, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeli düşük S değerlerinde düşük hesaplama zamanlarına sahiptir. Bu da SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelini gerçek zamanlı uygulamalar için uygun kılmaktadır.

Son olarak, Tablo 7.6'da çeşitli yüzey altı saçılımı sunumlarının görüntüle-

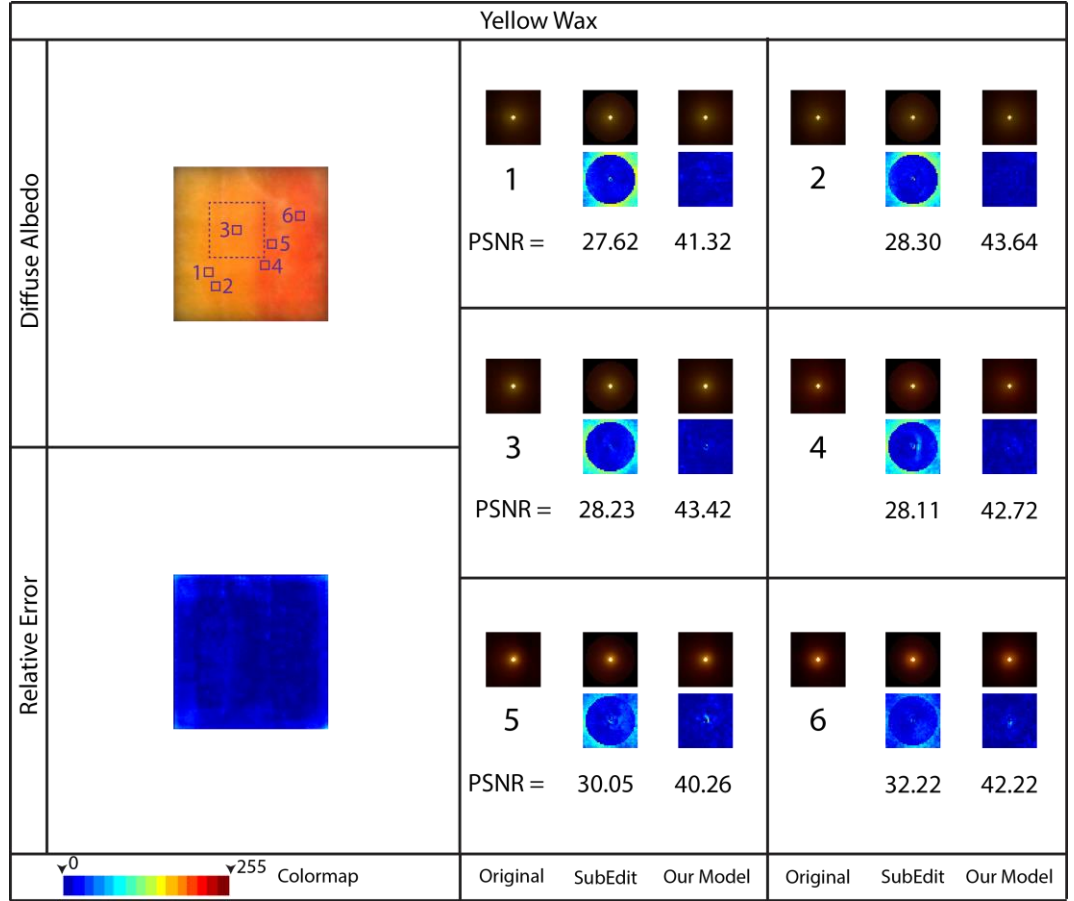
Tablo 7.6. Çeşitli yüzey altı saçılımı sunumlarının Şekil 7.7'deki ejderha objesini içeren sahneyi görüntüleme zamanları. Bu tablo ayrıca aynı sahneyi görüntülerken yüzey altı saçılımı sunumlarının kullandıkları veri miktarlarını da göstermektedir.

Örnek Malzeme	Mavi mum	Yeşim taşı	Sarı mum	Satranç tahtası (4 × 4)
Orjinal Veri Büyüklüğü	572 Mb	1.85 Gb	421 Mb	2.60 Gb
Orjinal Veri Gör. Zamanı	13.27 dak.	12.66 dak.	14.0 dak.	13.31 dak.
SubEdit Veri Büyüklüğü	5.61 Mb	18.57 Mb	3.60 Mb	21.08 Mb
SubEdit Gör. Zamanı	16.42 dak.	14.32 dak.	17.51 dak.	14.65 dak.
SVD Veri Büyüklüğü	2.48 Mb	7.88 Mb	1.56 Mb	8.96 Mb
SVD Gör. Zamanı	18.55 dak.	14.89 dak.	21.65 dak.	14.47 dak.

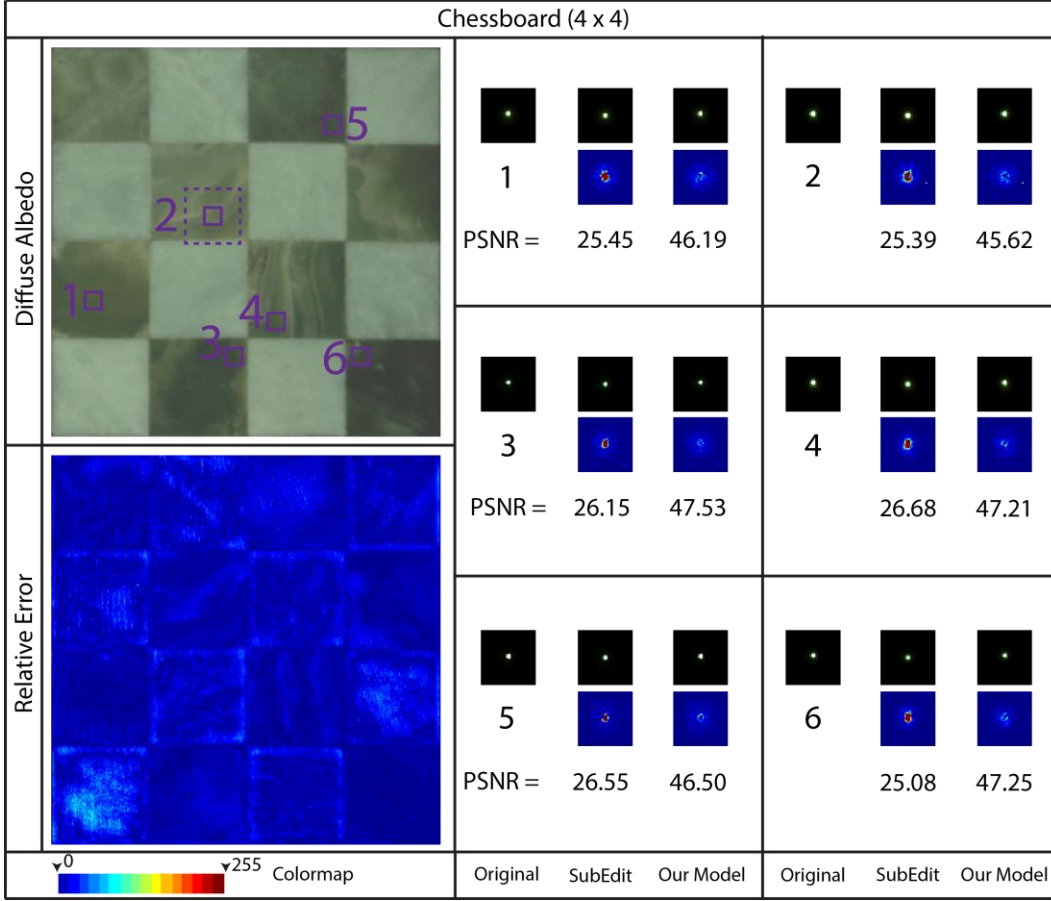


Şekil 7.12. Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Song et al.'ın sunumu (SubEdit) ile, SVD tabanlı sunumun yeşim taşı malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklendirilmiştir.

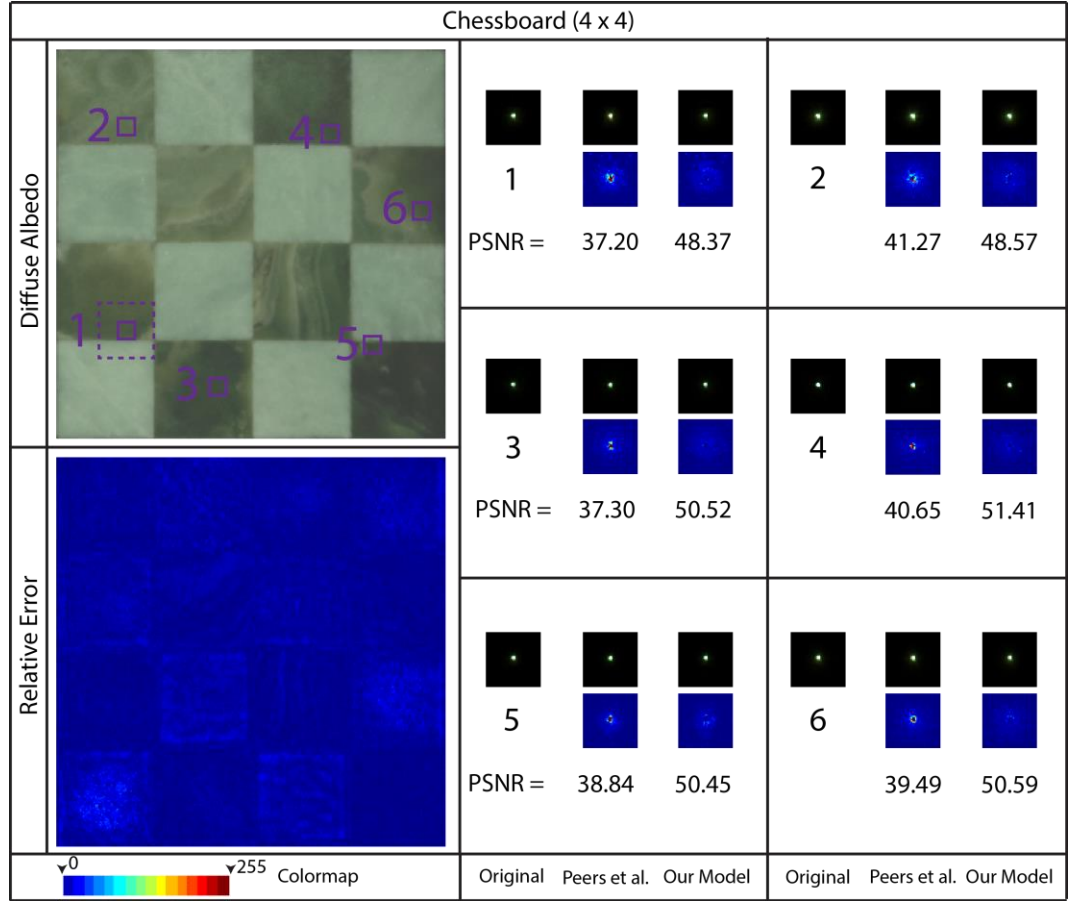
me zamanları üzerine bir kıyaslama bulunmaktadır. Bunun dışında, kıyaslanan yüzey altı saçılımı sunumlarının veri saklama miktarları da yine Tablo 7.6’da bulunabilir. Tablo 7.6’da, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunda hesaplama zamanına en çok etkisi olan model parametresi $S = 5$ olarak alınmıştır. Görüntüleme zamanları, 48 GB RAM’e ve Dual Intel Xeon X5650CPU@2.67 GHz özelliklerine sahip bir grafik iş istasyonunda ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumu Song et al.’ın modeline (SubEdit) göre kıyaslanabilir görüntüleme zamanlarına sahiptir. Bu durum da, SVD tabanlı yüzey altı saçılımı sunumunu gerçek zamanlı görüntüleme uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir.



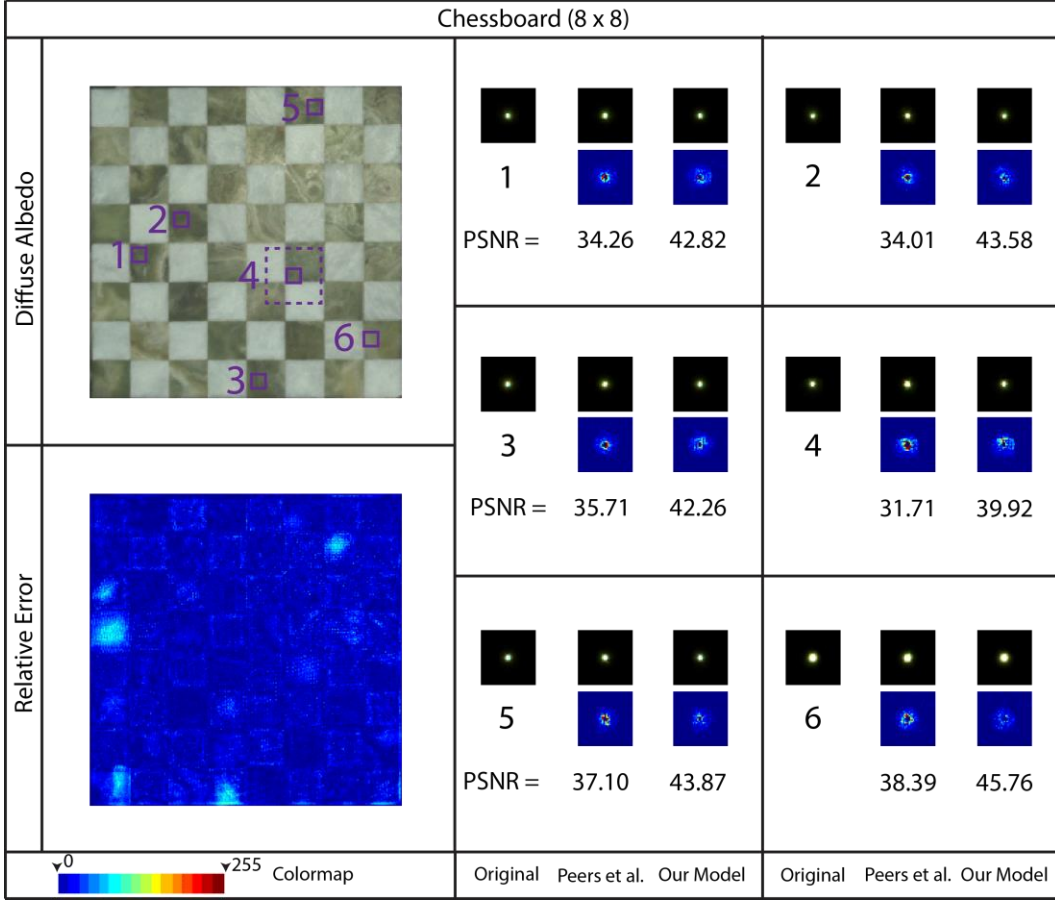
Şekil 7.13. Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Song et al.’ın sunumu (SubEdit) ile, SVD tabanlı sunumun sarı mum malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklendirilmiştir.



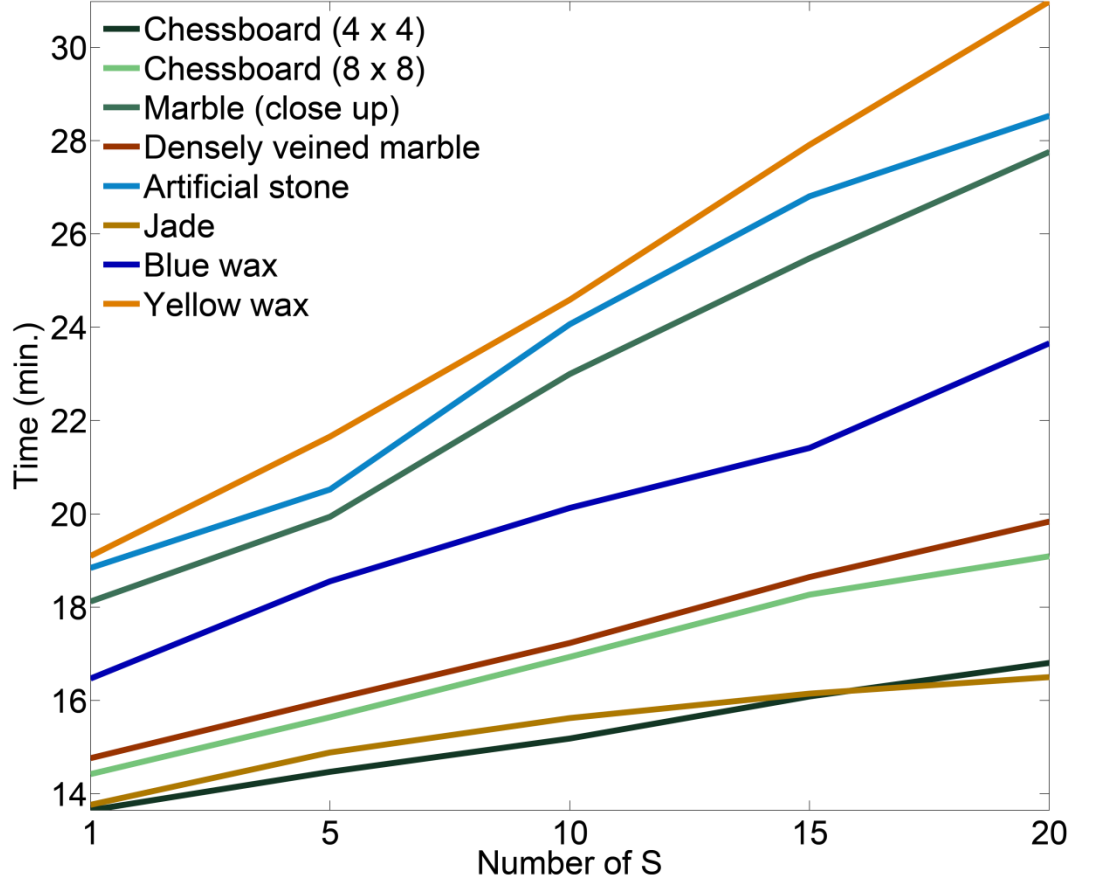
Şekil 7.14. Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Song et al.'ın sunumu (SubEdit) ile, SVD tabanlı sunumun satranç tahtası (4 × 4) malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri × 10 ile ölçeklendirilmiştir.



Şekil 7.15. Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Peers et al.'ın sunumu ile, SVD tabanlı sunumun satranç tahtası (4 × 4) malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri × 10 ile ölçeklendirilmiştir.



Şekil 7.16. Yaklaşık olarak eşit sıkıştırma oranlarında Peers et al.'ın sunumu ile, SVD tabanlı sunumun satranç tahtası (8×8) malzemesi üzerinde kıyaslanması. Her bir malzeme için, “diffuse albedo” eşlemesi, SVD tabanlı modelin nispi hata dağılımı, ve belirli piksellerdeki ölçümlenmiş ve modeller tarafından tahmin edilen tepkilerin görüntüleri gösterilmektedir. Tepkilerin yerleri “diffuse albedo” görüntüsünde gösterilmiştir. Ayrıca ölçümlenmiş tepkiler ile modeller tarafından tahmin edilen tepkiler arasında hata görüntüleri elde edilip PSNR değerleri rapor edilmiştir (yüksek PSNR daha iyi yaklaşım demektir). Daha iyi bir kıyaslama için, fark görüntüleri $\times 10$ ile ölçeklendirilmiştir.



Şekil 7.17. SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modelinin değişen S değerlerine göre görüntüleme zamanları. Zaman hesaplamaları Şekil 7.7'deki ejderha objesini içeren sahne üzerinde yapılmıştır.

8. ÖNERİLER

Bu tezde, literatürde mevcut olan belli başlı yüzey altı saçılımı modelleri incelenmiş, birbirleriyle kıyaslanmış ve bu alandaki modelleme yaklaşımları araştırılmıştır. Literatürde, yüzey altı saçılımı modellerinin kıyaslanmasına yönelik kapsamlı bir araştırmanın yapılmadığı anlaşılmıştır. Bu nedenle, tezin bu alanda çalışan araştırmacılar için önemli bir rehber niteliğinde olacağı düşünülmektedir.

Tezde, Tucker ayrıştırmasının heterojen yüzey altı saçılımı verisinin modellenmesinde ve gösteriminde başarı ile kullanılabileceği, bunun polinom yaklaşım ile beraber kullanıldığında ortaya hem az yer tutan, hem de etkin temsil gücüne sahip bir yüzey altı saçılımı modelinin çıkacağı gösterilmiştir.

Tezde ayrıca SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modeli ile, ölçümlenmiş yüzey altı saçılımı verisi oldukça etkin bir şekilde sunulmuştur. SVD yönteminin iki boyutlu verilerde oldukça etkin ve hızlı bir şekilde çalışması, SVD tabanlı yöntemin hem hızlı hem de etkin olmasını sağlamaktadır.

Yapılan görüntüleme zamanları kıyaslamalarında, SVD tabanlı yüzey altı saçılımına dayalı sunumun gerçek zamanlı uygulamalar için daha uygun olduğu anlaşılmıştır. Her ne kadar Tucker ayrıştırması ikiden büyük boyutlu verilerde daha etkin bir modelleme yeteneğine sahip olsa da üzerinde çalışılan verilerden elde edilen sonuçlar, iki boyutlu verilerde SVD yöntemi ile hemen hemen aynı modelleme yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir.

Bu tezde geliştirilen hem Tucker hem de SVD tabanlı yüzey altı saçılımı modellerinin parametre değerleri, değiştirilebilir özelliktedir. Bu parametreler sayesinde, hızlı çalışan ancak yaklaşım doğruluğu düşük veya yavaş çalışan ancak yaklaşım doğruluğu çok yüksek sunumlar da elde edilebilmektedir.

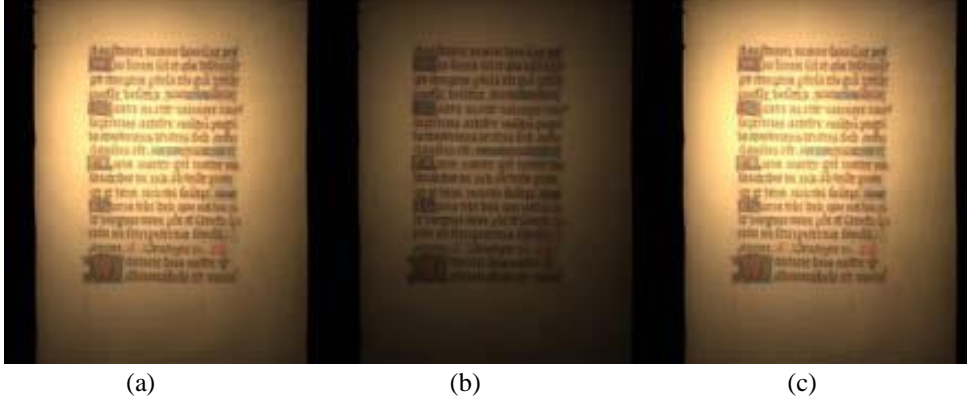
Bu tez kapsamında geliştirilen yöntemler, yüzey altı saçılımının gerçek zamanlı görüntüleme ve parametre “editing”i konularında önemli bir alt yapı oluşturmuştur. GPU donanımındaki gelişmelere paralel olarak çalışmalarımız bu yönde devam edecektir. Ayrıca, yarı saydam malzemelerin doğru ve hızlı bir şekilde ölçümlenmesinin de yüzey altı saçılımı sunumuna önemli bir katkı olacağı düşünülmektedir.

EK AÇIKLAMALAR-A

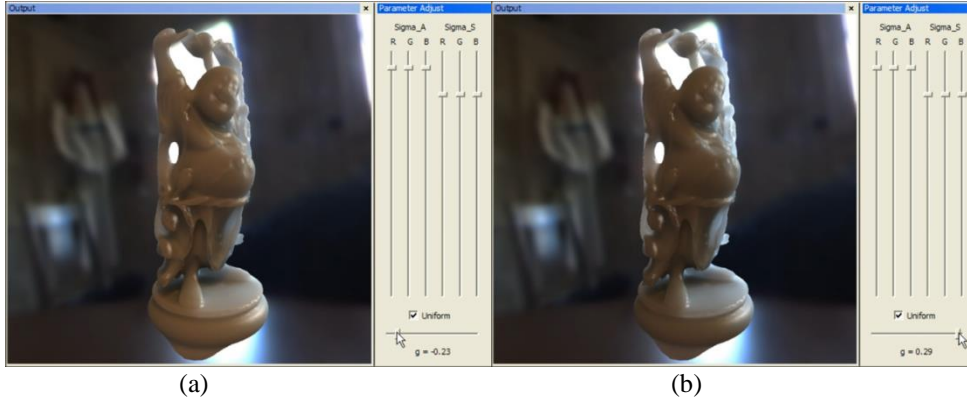
İKİ KUTUPLU YAYILIM YAKLAŞIMININ TARİHÇESİ

İki kutuplu yayılma yaklaşımı genel olarak medikal fizikte insan cildindeki lazer ışığının saçılımını modellemek için kullanılsa da (Eason et al., 1978; Farell et al., 1992), iki kutuplu yayılma yaklaşımı ilk olarak bilgisayar grafiklerine Jensen et al. (2001) tarafından uygulanmıştır. İki kutuplu yayılma yaklaşımı belki de bilgisayar grafiklerindeki en iyi bilinen BSSRDF modelidir. Bir çok yüzey altı saçılımı sunumu Jensen et al.’ın iki kutuplu yayılma yaklaşımından esinlenerek geliştirilmiştir. Bu bölümde, Jensen et al.’ın iki kutuplu yayılma yaklaşımından esinlenerek geliştirilen yüzey altı saçılımı sunumlarının çoğu tarihsel bir sırada listelenmektedir. Buradaki ana hedef, yüzey altı saçılımı sunumlarındaki eğilimleri vurgulamaktır:

- Jensen and Buhler (2002) iki kutuplu yayılma yaklaşımını hesaplamak için iki adımlı bir algoritma önermişlerdir. Bu algoritma Jensen et al.’ın BSSRDF örnekleme yönteminden daha hızlıdır.
- Donner and Jensen (2005) çok katmanlı yarı saydam malzemeleri modellemek için iki kutuplu yayılma yaklaşımını genelleştirerek çok kutuplu yayılma yaklaşımını sunmuşlardır. Şekil A.1’den de görüleceği üzere, Donner and Jensen’in (2005) yüzey altı saçılımı modeli Jensen et al.’ın yüzey altı saçılımı modeline göre çok katmanlı yarı saydam malzemeleri daha iyi sunmaktadır.
- Wang et al. (2005), Jensen et al.’ın BSSRDF modelini, Jensen and Buhler’in (2002) iki adımlı hierarşik tekniği ile beraber kullanarak gerçek zamanlı homojen yarı saydam malzemelerin görüntülenmesini gerçekleştirmişlerdir. Bu metod, homojen yarı saydam malzemeleri gerçek zamanlı “frame” oranlarında görüntüleyebilmek için önceden hesaplama zamanına ihtiyaç duymaktadır. Bu metodun diğer dezavantajları ise, statik sahne geometrisi, düşük frekanslı transfer ve uzak ışıklandırma.
- Xu et al. (2007), Jensen et al.’ın analitik BSSRDF modelini gerçek zamanlı olarak homojen yarı saydam malzemelerin “editing”i için kullanmışlardır. Bu metod da ayrıca gerçek zamanlı olarak homojen yarı



Şekil A.1. (a) Bir adet parşömen kağıdı tam Monte Carlo foton gezinim algoritması ile görüntülenmiştir (referans görüntü). (b) Jensen et al.'ın (2001) BSSRDF modeli, (c) Donner and Jensen'in BSSRDF modeli (2005). (Donner and Jensen, 2005).



Şekil A.2. Xu et al.'ın (2007) yüzey altı saçılımı sunumu Jensen et al.'ın (2001) BSSRDF modelinde kullanılan saçılım katsayısı (σ_s), emilim katsayısı (σ_a) ve saçılım açısının ortalama kosinüsünün (g) gerçek zamanlı “editing”ine müsaade etmektedir. Pozitif $g > 0$ esas ileri saçılma anlamına gelirken, negatif $g < 0$ esas geriye saçılma anlamına gelmektedir (Xu et al., 2007).

saydam malzemelerin görüntülenmesi ve “edit” edilmesi için önceden hesaplama zamanına ihtiyaç duymaktadır (Şekil A.2'ye bakınız).

- d'Eon et al. (2007) insan cildinin gerçek zamanlı görüntülenmesi için çok katmanlı bir yüzey altı saçılımı sunumu önermiştir. Bu yüzey altı saçılımı sunumu iki kutuplu veya çok kutuplu yayılma yaklaşımını Gaussian'ların sonlu bir adedinin toplamı ile doku-uzayında gerçekleştirmektedir.
- Jakob et al. (2010) Jensen et al.'ın BSSRDF sunumundan esinlenerek yeni bir anizotropik iki kutuplu yayılma yaklaşımını sunmuşlardır. Bu sayede anizotropik yarı saydam malzemeleri sunmak mümkün olmuştur.

- d'Eon and Irving (2011) nötron transfer teorisinden sayısallaştırılmış yayılma teorisini alarak çok katmanlı yüzey altı saçılımı modelini oluşturmuşlardır. Bu yöntemde, iki kutuplu veya çok kutuplu R_d fonksiyonları Gaussian'ların sonsuz adedi ile yer değiştirir. Bu sayede, d'Eon et al.'ın (2007) yüzey altı saçılımı modeline göre sonlu yakın bir tahminleme elde etmek çok daha kolaydır. d'Eon and Irving'in (2011) yüzey altı saçılımı modeli ayrıca kolaylıkla gerçek zamanlı metodlara (yalnızca bir kaç Gaussian seçerek) veya film üretimi görüntülemesine (tam bir doğruluk için 40 veya daha çok Gaussian seçerek) ölçeklenebilir.
- Jimenez et al. (Jimenez et al., 2009; Jimenez et al., 2010a; Jimenez et al., 2010b; Jimenez et al., 2012) insan cildinin gerçek zamanlı görüntülemesini ekran-uzayında gerçekleştirmişlerdir. Diğer bir deyişle, bu yüzey altı saçılımı sunumu iki kutuplu yayılma yaklaşımını ekran uzayında gerçekleştirmektedir ve bu durum görüntüleme zamanlarına göre kıyaslandığında d'Eon et al.'ın (2007) yüzey altı saçılımı sunumuna göre bir ilerleme olarak görülebilir.

Özet olarak, GPU donanımındaki mevcut gelişmeler yüzey altı saçılımı sunumlarının görüntüleme zamanını dakikalardan milisaniyelere indirmiştir. Bu gelişmelerle beraber, görsel olarak tatmin edici gerçek zamanlı yüzey altı saçılımı görüntülemesi ve “editing”i mümkün olmuştur. Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar neticesinde edinilen tecrübeye göre, bu yöndeki çalışmaların etkin gerçek zamanlı yüzey altı saçılımı görüntülemesi ve gerçek zamanlı parametre “editing”i üzerinde devam edeceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acar, E., Çamtepe, S.A. and Yener, B.**, 2006, Collective sampling and analysis of high order tensors for chatroom communications, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics, vol. 3975 of Lecture Notes in Computer Science, Springer, 213-224pp.
- Acar, E., Çamtepe, S.A., Krishnamoorthy, M.S. and Yener, B.**, 2005, Modeling and multiway analysis of chatroom tensors, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics, vol. 3495 of Lecture Notes in Computer Science, Springer, 256-268pp.
- Andersson, C.A. and Bro, R.**, 2000, The N-way toolbox for MATLAB, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 52:1-4pp. See also <http://www.models.kvl.dk/source/nwaytoolbox/>.
- Appelhof, C.J. and Davidson, E.R.**, 1981, Strategies for analyzing data from video fluorometric monitoring of liquid chromatographic effluents, Anal. Chem., 53:2053-2056pp.
- Bader, B.W., Berry, M.W. and Browne, M.**, 2007, Discussion tracking in enron email using PARAFAC, in Survey of Text Mining: Clustering, Classification, and Retrieval, Second Edition, Berry, M.W. and Castellanos, M. (Eds.), Springer, 147-162pp.
- Bader, B.W., Harshman, R.A. and Kolda, T.G.**, 2007, Temporal analysis of semantic graphs using ASALSAN, Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Data Mining, 33-42pp.
- Berry, W., Dumais, S.T. and O'Brien, G.W.**, 1995, Using linear algebra for intelligent information retrieval, SIAM Review, 37:573-595pp.
- Beylkin, G. and Mohlenkamp, M.J.**, 2002, Numerical operator calculus in higher dimensions, Proceedings of the National Academy of Sciences, 99:10246-10251pp.
- Bilgili, A., Öztürk, A. and Kurt, M.**, 2011, A general BRDF representation based on tensor decomposition, Computer Graphics Forum (Presented at Eurographics 2012), 30(8):2427-2439pp.
- Borshukov, G. and Lewis, J.P.**, 2003, Realistic human face rendering for "the matrix reloaded", ACM SIGGRAPH 2003 Sketches & Applications, New York, NY, USA, ACM, 1-1pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cattell, R.B.**, 1944, Parallel proportional profiles and other principles for determining the choice of factors by rotation, *Psychometrika*, 9:267–283pp.
- Cattell, R.B.**, 1952, The three basic factor-analytic research designs—their interrelations and derivatives, *Psych. Bull.*, 49:499–452pp.
- Chang, J.J. and Carroll, J.D.**, 1970, Analysis of individual differences in multidimensional scaling via an N-way generalization of 'Eckart-Young' decomposition, *Psychometrika*, 35:283-319pp.
- Dana, K.J., Van Ginneken, B., Nayar, S.K. and Koenderink J.J.**, 1999, Reflectance and texture of real-world surfaces, *ACM TOG*, 18(1):1–34pp.
- d'Eon, E. and Irving, G.**, 2011, A quantized-diffusion model for rendering translucent materials, *ACM TOG*, 30(4):56:1–56:14pp.
- d'Eon, E., Luebke, D.P. and Enderton, E.**, 2007, Efficient rendering of human skin, *Proc. of Eurographics Symposium on Rendering*, 147-157pp.
- Dong, Y., Wang, J., Pellacini, F., Tong, X. and Guo, B.**, 2010, Fabricating spatially-varying subsurface scattering, *ACM TOG*, 29(4):62:1–62:10pp.
- Donner, C. and Jensen, H.W.**, 2005, Light diffusion in multi-layered translucent materials, *ACM Trans. Graph.*, 24(3):1032-1039pp.
- Donner, C. and Jensen, H.W.**, 2006, A spectral bssrdf for shading human skin, *Proc. of Eurographics Symposium on Rendering*, 409-417pp.
- Donner, C., Lawrence, J., Ramamoorthi, R., Hachisuka, T., Jensen, H.W. and Nayar, S.**, 2009, An empirical bssrdf model, *ACM TOG*, 28(3):30:1–30:10pp.
- Donner, C., Weyrich, T., d'Eon, E., Ramamoorthi, R. and Rusinkiewicz, S.**, 2008, A layered, heterogeneous reflectance model for acquiring and rendering human skin, *ACM TOG*, 27(5):140:1–140:12pp.
- Eason, G., Veitch, A., Nisbet, R. and Turnbull, F.**, 1978, The theory of the backscattering of light by blood, *J. Physics*, 11:1463–1479pp.
- Farell, T.J., Patterson, M.S. and Wilson, B.**, 1992, A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties in vivo, *Med. Phys.*, 19:879–888pp.
- Fuchs, C., Goesele, M., Chen, T. and Seidel, H.-P.**, 2005, An Empirical Model for Heterogeneous Translucent Objects, Research Report MPI-I-2005-4-006, Max-Planck-Institut für Informatik.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ghosh, A., Hawkins, T., Peers, P., Frederiksen, S. and Debevec, P.**, 2008, Practical modeling and acquisition of layered facial reflectance, *ACM TOG*, 27(5):139:1–139:10pp.
- Goesele, M., Lensch, H.P.A., Lang, J., Fuchs, C. and Seidel, H.-P.**, 2004, DISCO: acquisition of translucent objects, *ACM Trans. Graph.*, 23(3):835-844pp.
- Hackbusch, W., Khoromskij, B.N. and Tyrtysnikov, E.E.**, 2005, Hierarchical kronecker tensor-product approximations, *Journal of Numerical Mathematics*, 13:119-156pp.
- Harshman, R.A.**, 1970, Foundations of the PARAFAC procedure: models and conditions for an "explanatory" multi-modal factor analysis, *UCLA Working Papers in Phonetics*, 16:1-84pp.
- Hasan, M., Fuchs, M., Matusik, W., Pfister, H. and Rusinkiewicz, S.**, 2010, Physical reproduction of materials with specified subsurface scattering, *ACM TOG*, 29(4):61:1–61:10pp.
- Henrion, R.**, 1994, N-way principal component analysis theory, algorithms and applications, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 25:1-23pp.
- Hitchcock, F.L.**, 1927, The expression of a tensor or a polyadic as a sum of products, *Journal of Mathematics and Physics*, 6:164-189pp.
- Horn, R.A. and Johnson, C.R.**, 1991, *Topics in Matrix Analysis*, Cambridge University Press, ISBN 0-521-46713-6.
- Igarashi, T., Nishino, K. and Nayar, S.K.**, 2007, The appearance of human skin: a survey, *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 3(1):1-95pp.
- Jakob, W., Arbree, A., Moon, J.T., Bala, K. and Marschner, S.**, 2010, A radiative transfer framework for rendering materials with anisotropic structure, *ACM TOG*, 29(4):53:1–53:13pp.
- Jakob, W.**, 2013, Mitsuba: Physically Based Renderer, URL: <http://www.mitsuba-renderer.org/> (Erişim tarihi: 21 Ocak 2014)
- Jensen, H.W. and Buhler, J.**, 2002, A rapid hierarchical rendering technique for translucent materials, *ACM Trans. Graph.*, 21(3):576-581pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jensen, H.W., Marschner, S.R., Levoy, M. and Hanrahan, P.**, 2001, A practical model for subsurface light transport, SIGGRAPH 2001, ACM Press, 511–518pp.
- Jimenez J., Jarabo, A. and Gutierrez, D.**, 2012, Separable Subsurface Scattering, Tech. Rep. RR-02-12, Departamento Informática e Ingeniería de Sistemas, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain.
- Jimenez, J., Scully, T., Barbosa, N., Donner, C., Alvarez, X., Viera T., Matis, P., Orvalho, V., Gutierrez, D. and Weyrich, T.**, 2010a, A practical appearance model for dynamic facial color, ACM TOG, 29(6):141:1–141:10pp.
- Jimenez, J., Sundstedt, V. and Gutierrez, D.**, 2009, Screen-space perceptual rendering of human skin, ACM TAP, 6(4):23:1–23:15pp.
- Jimenez, J., Whelan, D., Sundstedt, V. and Gutierrez, D.**, 2010b, Real-time realistic skin translucency, IEEE Computer Graphics and Applications, 30(4):32–41pp.
- Kajiya, J.T.**, 1986, The rendering equation, Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 86), 20(4):143-150pp.
- Kolda, T.G., Bader, B.W. and Kenny, J.P.**, Higher-order web link analysis using multi-linear algebra, Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Data Mining, IEEE Computer Society, 242-249pp.
- Kolda, T.G. and Bader, B.W.**, 2006, The TOPHITS model for higher-order web link analysis, in Workshop on Link Analysis, Counterterrorism and Security.
- Kolda, T.G. and Bader, B.W.**, 2009, Tensor Decompositions and Applications, SIAM Review, 51(3):455-500pp.
- Kramer, R.**, 1998, Chemometric Techniques for Quantitative Analysis, Marcel-Dekker, ISBN 0-8247-0198-4.
- Lathauwer, L.D. and Baynast, A.D.**, 2008, Blind deconvolution of DS-CDMA signals by means of decomposition in rank-(1,1, 1) terms, IEEE Transactions on Signal Processing., 56(4):1562-1571pp.
- Lathauwer, L.D. and Moor, B.D.**, 1998, From matrix to tensor: multilinear algebra and signal processing, in Mathematics in Signal Processing IV, McWhirter, J. and Proudler, I. (Eds.), Clarendon Press, Oxford, 1-15pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lathauwer, L.D., Castaing, J. and Cardoso, J.F.**, 2007, Fourth-order cumulant based blind identification of underdetermined mixtures, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55:2965-2973pp.
- Lathauwer, L.D, Moor, B.D. and Vandewalle, J.**, 2000a, A multilinear singular value decomposition, *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 21:1253-1278pp.
- Lathauwer, L.D, Moor, B.D. and Vandewalle, J.**, 2000b, On the best rank-1 and rank-(R_1, R_2, \dots, R_N) approximation of higher order tensors, *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 21:1324-1342pp.
- Lathauwer, L.D., Moor, B.D. and Vandewalle, J.**, 2001, Independent component analysis and (simultaneous) third-order tensor diagonalization, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 49:2262-2271pp.
- Lawrence, J., Rusinkiewicz S. and Ramamoorthi R.**, 2004, Efficient BRDF importance sampling using a factored representation. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):496-505pp.
- Mertens T., Kautz J., Bekaert P., Reeth F.V. and Seidel, H.-P.**, 2005, Efficient rendering of local subsurface scattering, *Computer Graphics Forum*, 24(1):41–49pp.
- Munoz, A., Echevarria, J.I., Seron, F.J., Lopez-Moreno, J., Glencross, M. and Gutierrez, D.**, 2011, BSSRDF estimation from single images, *Computer Graphics Forum*, 30(2):455–464pp.
- Narasimhan, S.G., Gupta, M., Donner, C., Ramamoorthi, R., Nayar, S. and Jensen, H.W.**, 2006, Acquiring scattering properties of participating media by dilution, *ACM Trans. Graph.*, 25(3):1003-1012pp.
- Nicodemus, F.E., Richmond, J.C., Hsia, J.J., Ginsber, I.W. and Limperis, T.**, 1977, Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance, *NBS Monograph 160*, U. S. Dept. of Commerce, 67p.
- Ozturk, A., Kurt M., Bilgili, A. and Gungor, C.**, 2008, Linear approximation of bidirectional reflectance distribution functions, *Computers & Graphics*, 32(2):149-158pp.
- Paatero, P. and Tapper, U.**, 1994, Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values, *Environmetrics*, 5:111–126pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pajarola, R., Suter, S.K. and Ruiters, R.**, 2013, Tensor approximation in visualization and computer graphics, EG 2013 - Tutorials, Gutierrez, D. and Myszkowski, K. (Eds.), Eurographics Association, Girona, Spain.
- Peers, P., Vom Berge, K., Matusik, W., Ramamoorthi, R., Lawrence, J., Rusinkiewicz, S. and Dutre, P.**, 2006, A compact factored representation of heterogeneous subsurface scattering, *ACM Trans. Graph.*, 25(3):746-753pp.
- Pharr, M. and Humphreys, G.**, 2013, PBRT: Physically Based Rendering Toolkit, URL: <http://www.pbrt.org/> (Erişim tarihi: 21 Ocak 2014)
- Richardson, I.E.**, 2002, Video Codec Design: Developing Image and Video Compression Systems, JohnWiley & Sons, Inc..
- Song, Y., Tong, X., Pellacini, F. and Peers, P.**, 2009, Subedit: a representation for editing measured heterogeneous subsurface scattering, *ACM TOG*, 28(3):31:1–31:10pp.
- Stam, J.**, 1995, Multiple scattering as a diffusion process, *Proc. of EurographicsWorkshop on Rendering*, Springer, 41–50pp.
- Sun, X., Zhou, K., Chen, Y., Lin, S., Shi, J. and Guo, B.**, 2007, Interactive relighting with dynamic brdfs, *ACM Trans. Graph.*, 26(3):27:1-27:10pp.
- Tong, X., Wang, J., Lin, S., Guo, B. and Shum, H.-Y.**, 2005, Modeling and rendering of quasi-homogeneous materials, *ACM Trans. Graph.*, 24(3):1054-1061.
- Tong, X., Zhang, J., Liu, L., Wang, X., Guo, B. and Shum, H.-Y.**, 2002, Synthesis of bidirectional texture functions on arbitrary surfaces, *ACM TOG*, 21(3):665–672pp.
- Trefethen, L.N. and Bau, D.**, 1997, *Numerical Linear Algebra*, Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN 978-0-89871-361-9.
- Tucker, L.R.**, 1963, Implications of factor analysis of three-way matrices for measurement of change, in *Problems in Measuring Change*, Harris, C.W. (Eds.), University of Wisconsin Press, 122-137pp.
- Tucker, L.R.**, 1964, The extension of factor analysis to three-dimensional matrices, in *Contributions to Mathematical Psychology*, Gulliksen, H. and Frederiksen, N. (Eds.), Holt, Rinehardt, & Winston, New York.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tucker, L.R.**, 1966, Some mathematical notes on three-mode factor analysis, *Psychometrika*, 31:279-311pp.
- Vasilescu, M.A.O. and Terzopoulos, D.**, 2002a, Multilinear image analysis for facial recognition, Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition, 511-514pp.
- Vasilescu, M.A.O. and Terzopoulos, D.**, 2002b, Multilinear analysis of image ensembles: Tensor Faces, Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision, vol. 2350 of Lecture Notes in Computer Science, Springer, 447-460pp.
- Vasilescu, M.A.O. and Terzopoulos, D.**, 2003, Multilinear subspace analysis of image ensembles, Proceedings of the 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society, 93-99pp.
- Wang, J., Zhao, S., Tong, X., Lin, S., Lin, Z., Dong, Y., Guo, B. and Shum, H.-Y.**, 2008, Modeling and rendering of heterogeneous translucent materials using the diffusion equation, *ACM TOG*, 27(1):9:1-9:18pp.
- Wang, R., Tran, J. and Luebke, D.**, 2005, All-frequency interactive relighting of translucent objects with single and multiple scattering, *ACM TOG*, 24(3):1202-1207pp.
- Weyrich, T., Lawrence, J., Lensch, H., Rusinkiewicz, S. and Zickler, T.**, 2008, Principles of appearance acquisition and representation, *ACM SIGGRAPH 2008 classes*, 80:1-119pp.
- Xu, D., Yan, S., Lin, S., Huang, T.S. and Chang, S.-F.**, 2011, Enhancing bilinear subspace learning by element rearrangement, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(10):1913-1920pp.
- Xu, K., Gao, Y., Li, Y., Ju, T. and Hu, S.-M.**, 2007, Real-time homogenous translucent material editing, *Computer Graphics Forum*, 26(3):545-552pp.

ÖZGEÇMİŞ

20.06.1981 yılında, Bergama, İzmir’de doğan Murat Kurt, 1998-2002 yılları arasında Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği’nde eğitim görerek, İnşaat Mühendisi ünvanını elde etmiştir. Yine 2003 yılında yüksek lisans öğrenimine başladığı Ege Üniversitesi Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü’nden 2007 yılında Bilgisayar Bilimleri Dalı’nda yüksek lisans derecesi ile mezun olmuş ve aynı yıl içerisinde bu enstitüde yine Bilgisayar Bilimleri Dalı’nda doktora öğrenimine başlamıştır. 2005 yılından bugüne kadar da yine Ege Üniversitesi Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü’nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Bugüne kadar bilgisayar grafikleri alanında, özellikle malzeme görünümü modelleme, görüntüleme, önemine göre örnekleme üzerine araştırmalarda bulunan Murat Kurt, ilgili araştırma konularında çeşitli bilimsel dergi ve kitap serilerinde yayınlanan, uluslararası yayın indekslerince taranan ve çeşitli uluslararası bilimsel konferanslarda sunulan 15’den fazla bildiri, posterli bildiri ve makalesi bulunmaktadır. Bunun dışında bilgisayar grafikleri ve görüntü işleme alanlarında toplamda 8’den fazla ulusal (BAP, KOSGEB, TÜBİTAK) ve uluslararası (6. Çerçeve Avrupa Birliği) projede yer almıştır.

EKLER

Ek 1 Türkçe-İngilizce Terimler Sözlüğü

Ek 1 Türkçe-İngilizce Terimler Sözlüğü

ağırlıklandırma	weighting
analitik	analytical
anizotropik	anisotropic
ayırıştırma	decomposition
büst	bust
çekirdek	kernel
çoklu-spektral	multi-spectral
çok katmanlı	multilayered
çok kutuplu	multipole
doku eşlemesi	texture mapping
doku-uzayı	texture-space
düzgün	uniform
ejderha	dragon
ekran-uzayı	screen-space
emilim	absorption
enerjinin korunumu	energy conservation
fabrikasyon	fabricated
faktörizasyon	factorization
fiziksel tabanlı	physically based
foton	photon
foton eşleme	photon mapping
foton gezinim	photon tracing
frekans	frequency

geometri-uzayı	geometry-space
gerçek zamanlı	real time
gölge	shadow
görüntü	image
görüntüleme	rendering
hacimsel	volumetric
heykel	statue
heterojen	heterogeneous
hizalama	alignment
homojen	homogeneous
ışıklandırma	lighting
ışınımsal	radiative
iki çizgili doğrusal	bilinear
iki kutuplu	dipole
iki yönlü	bidirectional
iletkenlik	transmittance
insan cildi	human skin
izotropik	isotropic
kapsam	scope
karşılıklı olma	reciprocity
katman	layer
kaymaktaşı	alabaster
keci yavrusu	kitten
kompakt	compact

lokal-homojen	locally-homogeneous
malzeme görünümü	material appearance
mavi mum	blue wax
mermer	marble
modelleme	modeling
mum	wax
negatif olmayan	non-negative
optik kalın	optically thick
öbek	cluster
öbeleme	clustering
öklit mesafesi	euclidean distance
ölçeklenebilirlik	scalability
ölçümlenmiş	measured
önemine göre örnekleme	importance sampling
ön-işlem	pre-process
paralellik	parallelism
parçalı	piecewise
parlama	irradiance
radıans	radiance
regresyon	regression
saçılım	scattering
sağlamlık	robustness
sarı mum	yellow wax
satranç tahtası	chessboard

sayısallaştırılmış	quantized
seyreltilmiş	diluted
sıkıştırma	compression
sıkıştırma oranı	compression ratio
sıralama	reorder
speküler	specular
spot ışıklandırma	spot lighting
sunum	representation
tam	full
tekil	singular
tepki	response
tepki fonksiyonu	response function
uygulama	implementation
uzak ışıklandırma	distant lighting
uzaysal değişen	spatially-varying
veriye-dayalı	data-driven
veri seti	data set
yakın çekim	close up
yaklaşım	approximation
yansıma	reflectance
yapay taş	artificial stone
yarı saydam	translucent
yayılma	diffusion
yayılma yaklaşımı	diffusion approximation

yeşim taşı	jade
yol gezinim	path tracing
yol uzayı	path space
yoğun damarlı mermer	densely veined marble
yüzey altı	subsurface
yüzey altı saçılımı	subsurface scattering