



Monokromatik Eş-Fazlı Işık Kaynakları ve Çoklu Algılama Sistemi ile Yüksek Çözünürlüklü Görüntüleme

Nanobilim ve Nanoteknoloji Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Rahmi Şafak Arıcı

ORCID 0009-0009-5412-7019

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aziz Kolkıran

Kasım 2024

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi **Rahmi Şafak Arıcı** tarafından hazırlanan **Monokromatik Eş-Fazlı Işık Kaynakları ve Çoklu Algılama Sistemi ile Yüksek Çözünürlüklü Görüntüleme** başlıklı bu çalışma tarafımızca okunmuş olup, yapılan savunma sınavı sonucunda kapsam ve nitelik açısından başarılı bulunarak jürimiz tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

ONAYLAYANLAR:

Tez Danışmanı: **Dr. Öğr. Üyesi Aziz Kolkıran**
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Jüri Üyeleri:
Dr. Öğr. Üyesi Aziz Kolkıran
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa Can
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Raşit Çakır
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi

Savunma Tarihi: 26.11.2024

Yazarlık Beyanı

Ben, **Rahmi Şafak Arıcı**, başlığı **Monokromatik Eş-Fazlı Işık Kaynakları ve Çoklu Algılama Sistemi ile Yüksek Çözünürlüklü Görüntüleme** olan bu tezimin ve tezin içinde sunulan bilgilerin şahsıma ait olduğunu beyan ederim. Ayrıca:

- Bu çalışmanın bütünü veya esası bu üniversitede Yüksek Lisans derecesi elde etmek üzere çalıştığım süre içinde gerçekleştirilmiştir.
- Daha önce bu tezin herhangi bir kısmı başka bir derece veya yeterlik almak üzere bu üniversiteye veya başka bir kuruma sunulduysa bu açık biçimde ifade edilmiştir.
- Başkalarının yayımlanmış çalışmalarına başvurduğum durumlarda bu çalışmalara açık biçimde atıfta buldum.
- Başkalarının çalışmalarından alıntıladığımda kaynağı her zaman belirttim. Tezin bu alıntılar dışında kalan kısmı tümüyle benim kendi çalışmamdır.
- Kayda değer yardım aldığım bütün kaynaklara teşekkür ettim.
- Tezde başkalarıyla birlikte gerçekleştirilen çalışmalar varsa onların katkısını ve kendi yaptıklarımı tam olarak açıkladım.

Tarih:

26.11.2024

Monokromatik Eş-Fazlı Işık Kaynakları ve Çoklu Algılama Sistemi ile Yüksek Çözünürlüklü Görüntüleme

Öz

Optik bilimi ilk çağlardan itibaren insanlığın ilgisini çekmiş ve sürekli bir gelişim içinde olmuştur. Özellikle teknolojinin ilerlemesi ile birlikte optik biliminde meydana gelen gelişmeler çığır açıcı seviyeye ulaşmıştır. Işığın özellikleri tanımlanmış ve kırınım metodu kullanılarak görüntü elde edilmiştir. Modern optiğin gelişmesi ile birlikte klasik optik çözünürlük limitlerine (Rayleigh Kriteri ya da Abbe Limit) ulaşılmıştır. Kuantum optik sayesinde süper-çözünürlük (dalga boyu altı çözünürlük) elde edilmiştir. Yüksek çözünürlüklü görüntüleme sayesinde nano boyutta nesnelere incelenebilir hale gelmiştir.

Bu tez çalışmasında, kuantum korelasyon özelliğine sahip olmayan bağımsız tek foton kaynakları ve foton-foton yoğunluk korelasyon algılama yöntemi kullanılarak klasik optik çözünürlük limitlerinin üzerinde bir görüntü kalitesine ulaşılabileceği sayısal hesaplama metodları kullanılarak gösterilmiştir. Monokromatik eş fazlı ışık kaynağı, dairesel açıklık ve dedektör ile kurulan sistemde Kirchhoff kırınım integrali ve kuantum girişim yöntemi kullanılarak çözünürlük grafikleri elde edilmiştir. Kaynak ve dedektör sayısının aynı oranda artması ile klasik optik çözünürlük limitlerinin aşıldığı, grafik karşılaştırmaları yapılarak gösterilmiştir.

Anahtar Sözcükler: süper-çözünürlük, kuantum girişim, klasik çözünürlük limiti, monokromatik eş fazlı ışık kaynağı, dairesel açıklık, kırınım metodu, Kirchhoff kırınım integrali, foton-foton yoğunluk korelasyon algılama yöntemi, sayısal hesaplama metodları

Superresolution Using Coherent Light Sources and Multiple Detectors

Abstract

The science of optics has attracted the attention of humanity since the early ages and has been in a continuous development. Especially with the advancement of technology, the developments in optics have reached a groundbreaking level. The properties of light have been defined and images have been obtained by the diffraction method. With the development of modern optics, classical optical resolution limits (Rayleigh Criterion or Abbe Limit) have been reached. Super-resolution (subwavelength resolution) has been achieved thanks to quantum optics. Thanks to high-resolution imaging, nano-sized objects have become examinable.

In this thesis, it has been shown by using numerical calculation methods that an image quality above the classical optical resolution limits can be achieved by using independent single photon sources without quantum correlation feature and photon-photon intensity correlation detection method. Resolution graphics have been obtained by using Kirchoff diffraction integral and quantum interference method in the system established with monochromatic coherent light source, circular aperture and detector. It has been shown by graphic comparisons that classical optical resolution limits are exceeded by increasing the number of sources and detectors at the same rate.

Keywords: superresolution, quantum interference, classical resolution limits, monochromatic coherent light source, circular aperture, diffraction method, kirchoff diffraction integral, photon-photon intensity correlation detection method, numerical calculation methods

Teşekkür

Öncelikle, tez konumun seçimi ve geliştirilmesi sırasında bana rehberlik eden, engin bilgi ve deneyimiyle her aşamada destek olan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Aziz Kolkıran'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin yönlendirmeleri, eleştirileri ve teşvikleri bu çalışmanın oluşmasında büyük rol oynamıştır.

Ayrıca, Nanobilim ve Nanoteknoloji Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Mustafa Can'a verdiği destek ve sağladığı imkanlar için çok teşekkür ederim.

Diğer yandan tez savınma jürimde bulunup değerli yorumları ile katkı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Raşit Çakır'a teşekkür ederim.

Son olarak, bu süreçte manevi desteklerini her zaman hissettiğim aileme, özellikle eşim Sezin Arıcı'ya minnettarlığımı ifade etmek istiyorum. Onların sabrı, anlayışı ve teşviki olmasaydı bu çalışmayı tamamlamak benim için çok daha zor olurdu.

İçindekiler

Yazarlık Beyanı.....	ii
Öz	iii
Abstract	iv
Teşekkür.....	v
İçindekiler	vi
Şekiller Listesi.....	viii
Kısaltmalar Listesi	x
Semboller Listesi.....	xi
1. Giriş	1
2. Teorik Arka Plan	8
2.1 Monokromatik Eş-fazlı Işık Kaynakları	8
2.2 Kirchhoff Kırınım İntegrali	9
2.3 Çoklu Algılama Sistemi	10
2.4 Foton-Foton Yoğunluk Korelasyon Algılama Yöntemi.....	10
3. Hesaplama Yöntemleri	13
3.1 Tek Işık Kaynağı ve Tek Dedektör ile Sistem-1	13
3.2 İki Işık Kaynağı ve İki Dedektör ile Sistem-2.....	15
3.3 Dört Işık Kaynağı ve Dört Dedektör ile Sistem-3	17

4. Analiz ve Tartışma	21
4.1 Analiz	21
4.2 Araştırmanın Sınırlamaları ve Olası Hata Kaynakları.....	27
4.3 Gelecek Araştırma Önerileri.....	28
5. Değerlendirme ve Sonuç	29
Kaynaklar	34
Ekler.....	37
Ek A. Balistika - Balistik İnceleme Sistemi.....	38

Şekiller Listesi

Şekil 1.1: Airy Disk (Ersoy, 2007).....	3
Şekil 3.1: Bir monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki eş dairesel açıklık ve bir dedektör içeren sistem.....	14
Şekil 3.2: İki monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki eş dairesel açıklık ve iki dedektör içeren sistem.....	16
Şekil 3.3: Dört monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki eş dairesel açıklık ve dört dedektör içeren sistem.....	18
Şekil 4.1: $a=0.25\lambda$, $d=0.25\lambda$, $R_z=-0.25\lambda$, $r_z=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği	22
Şekil 4.2: Dairesel yarıkların 2B çizimi (solda) ve $a=0.25\lambda$, $d=0.25\lambda$, $R_z=-0.25\lambda$, $r_z=100\lambda$ için elde edilen 2B görüntü (sağda)	22
Şekil 4.3: $a=0.25\lambda$, $d=0.125\lambda$, $R_z=-0.25\lambda$, $r_z=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği	23
Şekil 4.4: Dairesel yarıkların 2B çizimi (solda) ve $a=0.25\lambda$, $d=0.125\lambda$, $R_z=-0.25\lambda$, $r_z=100\lambda$ için elde edilen 2B görüntü (sağda)	23
Şekil 4.5: $a=0.25\lambda$, $d=0.25\lambda$, $R_{1z}=R_{2z}=-0.25\lambda$, $R_{1x}=0.5\lambda$, $R_{2x}=-0.5\lambda$, $r_z=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği.....	24
Şekil 4.6: Dairesel yarıkların 2B çizimi (solda) ve $a=0.25\lambda$, $d=0.25\lambda$, $R_{1z}=R_{2z}=-0.25\lambda$, $R_{1x}=0.5\lambda$, $R_{2x}=-0.5\lambda$, $r_z=100\lambda$ için elde edilen 2B görüntü (sağda)	24

Şekil 4.7: $a=0.25\lambda$, $d=0.125\lambda$, $R1z=R2z=-0.25\lambda$, $R1x=0.5\lambda$, $R2x=-0.5\lambda$, $rz=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği..... 25

Şekil 4.8: Dairesel yarıkların 2B çizimi (solda) ve $a=0.25\lambda$, $d=0.125\lambda$, $R1z=R2z=-0.25\lambda$, $R1x=0.5\lambda$, $R2x=-0.5\lambda$, $rz=100\lambda$ için elde edilen 2B görüntü (sağda) 25

Şekil 4.9: $a=0.25\lambda$, $d=0.25\lambda$, $R1z=R2z=R3z=R4z=-0.25\lambda$, $R1x=0.5\lambda$, $R2x=-0.5\lambda$, $R3x=0.25\lambda$, $R4x=-0.25\lambda$, $rz=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği 26

Şekil 4.10: $a=0.25\lambda$, $d=0.125\lambda$, $R1z=R2z=R3z=R4z=-0.25\lambda$, $R1x=0.5\lambda$, $R2x=-0.5\lambda$, $R3x=0.25\lambda$, $R4x=-0.25\lambda$, $rz=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği 26

Şekil 5.1: Elde Edilen Çözünürlük Grafikleri a) Tek Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık Tek Dedektör, b) İki Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık İki Dedektör, c) Dört Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık Dört Dedektör (Dairesel Açıklık : 0.25λ , Dairesel Açıklıklar Arası Mesafe : 0.25λ , Işık Kaynağı ve Dairesel Açıklıklar Arası Mesafe : 0.25λ , Dairesel Açıklıklar ile Dedektör Arası Mesafe : 100λ)..... 31

Şekil 5.2: Elde Edilen Çözünürlük Grafikleri a) Tek Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık Tek Dedektör, b) İki Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık İki Dedektör, c) Dört Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık Dört Dedektör (Dairesel Açıklık : 0.25λ , Dairesel Açıklıklar Arası Mesafe : 0.125λ , Işık Kaynağı ve Dairesel Açıklıklar Arası Mesafe : 0.25λ , Dairesel Açıklıklar ile Dedektör Arası Mesafe : 100λ)..... 32

Ek Şekil 1: Hafif silah fişegine ait parçalar (Özbektaş & Sungur, 2022)..... 38

Ek Şekil 2: Ateşli Silah Mekanizması (Handtmann, 2011) 39

Ek Şekil 3: Delil Mukayese Mikroskobu (Zheng vd, 2014)..... 40

Ek Şekil 4: Balistika kabin görseli..... 40

Kısaltmalar Listesi

1B	Bir boyutlu
2B	İki boyutlu
3B	Üç boyutlu
μm	Mikro metre
yy	Yüz yıl

Semboller Listesi

θ	Rayleigh Limit için minimum ayırt edilebilir açı
λ	Işığın dalga boyu
D	Dairesel delik veya merceğin çapı
a	Dairesel delik veya merceğin yarıçapı
d	Dairesel deliklerin birbirine en yakın olduğu iki nokta arası mesafe
\emptyset	Faz farkı
E	Işığın elektrik alanı
E_0	Işığın Genliği
ω	Açısal frekans
k	Dalga vektörü
t	Zaman çarpanı
U	Işık kaynağının genliği
r	Kaynak noktası ile gözlem noktası arasındaki mesafe
$\frac{\partial}{\partial n}$	Yüzeye normal doğrultudaki türev
dS	Açıklık üzerindeki sonsuz küçük yüzek elemanı
$G^{(1)}$	Birinci derece foton-foton yoğunluk korelasyon fonksiyonu
$G^{(2)}$	İkinci derece foton-foton yoğunluk korelasyon fonksiyonu
$G^{(4)}$	Dördüncü derece foton-foton yoğunluk korelasyon fonksiyonu
G	Green fonksiyonu

Bölüm 1

Giriş

Optik bilimi tarih boyunca insanların ilgisini çekmiştir. Temel olarak optik bilimi, ışığın doğası, özellikleri ve madde ile etkileşimini incelemektedir. Optik ile ilgili en önemli gelişmeler dört dönemde incelenebilir. Yunan ve Helenistik dönemde ışık ve görme üzerine çalışmalar yapılmış, görme kavramının anlaşılması için uğraşmıştır. Öklid, geometrik optik prensiplerini geliştirmiş ve Batlamyus ise kırılma yasalarını incelemiştir. Gözün anatomisi ve fizyolojisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu dönemde ışığın gözden çıktığı görüşü hakim olmuştur (Vohnsen, 2004). Erken dönemde ortaya atılan optik teorilerinin epistemolojik eksiklikleri, optik teorileri geliştirmede zorluk oluşturmuştur (Andreou & Raftopoulos, 2010). İslam medeniyeti döneminde İbn-i Heysem önemli bir yer tutmaktadır ve modern fiziğin babası olarak bilinmektedir. İbn-i Heysem ışığın gözden çıkmadığını, nesnelere göre geldiğini deneysel olarak ispat etmiştir (Smith, 2004). Karanlık oda ve iğne deliği kamerası ile ışığın düz çizgiler halinde yayıldığını göstermiştir. Kitab-ül Menazır adlı eseri yıllar boyunca optik çalışmalarında başvuru kaynağı olmuştur. İbn-i Sahl, Snell Yasası olarak da bilinen kırılma yasasını keşfetmiştir. Avrupa çağında, Kepler, İbn-i Heysem'in iğne deliği kamerasını geliştirerek modern kameranın temellerini atmıştır. Newton, ışığın tanecikli yapıda olduğunu savunarak, kırılma ve yansıma üzerine çalışmalar yapmıştır. Huygens dalga teorisini geliştirerek kırınım teorisini açıklamıştır (Zubairy, 2016). Gustav Robert Kirchhoff, 1800'lerin sonlarında difraksiyonun matematiksel teorisini geliştirerek Huygens-Fresnel teorisindeki keyfiliği ortadan kaldırmıştır (Boxem vd, 2013).

19. yüzyılda Thomas Young ve Augustin-Jean Fresnel'in gerçekleştirdiği çift yarıklı deneyi, ışığın dalga doğasını kanıtlamış ve dalga optiğinin gelişimine zemin hazırlamıştır. Bu dönemde James Clerk Maxwell tarafından geliştirilen

elektromanyetik teori, ışığın dalga özelliklerini daha iyi anlamamıza yardımcı olmuştur. Maxwell'in denklemleri, ışığın elektromanyetik dalga olarak tanımlanmasına olanak tanımıştır (Guarnieri, 2015).

Çift yarık deneyi ile aynı zamanda, Rayleigh Kriteri ya da Abbe Limit olarak bilinen, optik sistemlerin çözünürlüğünü belirleyen önemli bir kriter ortaya atılmıştır. Buna göre iki nokta kaynağının ayırt edilebilirliği tanımlanmaktadır. Bu kriter, özellikle mikroskoplar, teleskoplar ve diğer optik cihazlar için geçerlidir. Rayleigh kriterine göre, iki noktanın ayrı olarak algılanabilmesi için bu noktalar arasındaki açının belirli bir minimum değerden büyük olması gerekmektedir. Bu minimum açı, ışığın dalga boyuna ve sistemin açısal açıklığına bağlıdır (Andreou & Raftopoulos, 2010).

Rayleigh Kriteri, aşağıdaki formülle ifade edilmektedir.

$$\theta = 1.22 \lambda / D \quad (1.1)$$

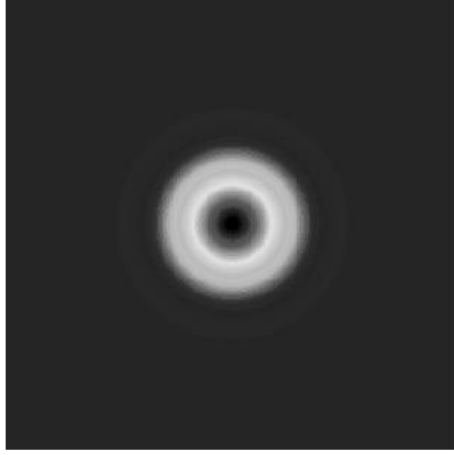
Burada;

θ : Minimum ayırt edilebilir açı

λ : Işığın dalga boyu

D : Dairesel delik veya merceğin çapı

Bu formül, bir ışık kaynağından çıkan ışığın dairesel bir delikten geçerken kırınımına uğraması sonucu oluşan "Airy disk" adı verilen aydınlık ve karanlık halkaların merkezindeki ilk karanlık halkaya kadar olan açığı tanımlar. Işığın kırınımı nedeniyle, iki nokta kaynağı arasındaki minimum mesafe, bu açı ile belirlenir, dolayısıyla daha kısa dalga boyları kullanarak daha yüksek çözünürlük elde etmek mümkündür (Ersoy, 2007).



Şekil 1.1: Airy Disk (Ersoy, 2007)

20.yy ise kuantum çağı olarak adlandırılabilir. Kuantum optiği, ışığın kuantum özelliklerini inceleyen bir bilim dalıdır ve modern fiziğin temel taşlarından biri olan kuantum mekaniği ile yakından ilişkilidir (Browne vd, 20217). Plank, Einstein ve Bohr'un çalışmaları ile ışığın hem dalga hem parçacık olduğu ortaya çıkarılmış ve kuantum mekaniğinin temelleri atılmıştır. Yoğunlaştırılmış ışık olan lazerin (Guarnieri, 2018) icadı ile birçok teknolojik gelişme ortaya çıkmıştır (Zubairy, 2016).

Son yıllarda yakın alan optiği ve kuantum girişim teknolojileri, dalga boyunun altında çözünürlük elde etme konusunda devrim niteliğinde gelişmelere yol açmıştır. Yakın alan optiği, ışığın nanometre ölçeğinde kontrol edilmesine olanak tanırken, kuantum girişim ise fotonların etkileşimleri üzerinden yeni ölçüm teknikleri geliştirilmesine imkan sağlamıştır (Oshikane vd, 2007). Bu teknolojiler sayesinde, Rayleigh kriterinin ötesine geçerek atomik düzeyde görüntüleme ve ölçüm yapılabilmektedir (Kolkıran, 2024).

Literatürde bulunan çalışmalar incelendiğinde, klasik optik çözünürlük limitlerini aşmak ve dalga boyu altında çözünürlük elde etmek için yakın alan optiği, sönümlü dalgalar ve kuantum girişim gibi yöntemler kullanıldığı görülmektedir (Kolobov M. I., 2008).

Ferri vd. (2005) yaptığı çalışmada, hayalet görüntüleme tekniği ve uzaysal olarak tutarsız ışık kaynağı kullanarak yüksek çözünürlük elde etmiştir. Farklı noktalarda

fazları rastgele ve zamana bağılı olarak değişen, benek desenleri oluşturan ışık türü uzaysal olarak tutarsız ışık şeklinde tanımlanmaktadır. Makaledeki deneylerde kullanılan uzaysal olarak tutarsız ışık kaynağı, yavaşça dönen bir zımpara camı ve 3 µm lateks küreler içeren bulanık bir çözelti ile sağlanmıştır. Hayalet görüntüleme ise uzaysal olarak ilişkili iki ışın kullanılarak nesnelere hakkında bilgi edinmeyi sağlayan bir tekniktir. Yapılan çalışmada iki uzaysal olarak ilişkili ışından biri bir nesneyi aydınlatırken diğeri referans düzeneden geçmektedir. Bu iki ışının uzaysal dağılımları ilişkilendirilerek nesne hakkında bilgi elde edilmektedir. Sonuç olarak, hayalet görüntüleme ile yüksek çözünürlük elde etmenin sadece dolanık fotonlar ile değil klasik ışık kaynaklarıyla da yapılabileceği ortaya koyulmuştur. Yapılan çalışmanın, hayalet görüntüleme alanındaki araştırmaların yönünü değiştirebileceği ve maliyet etkin çözümlerin geliştirilmesine olanak sağlayabileceği belirtilmiştir (Ferri vd, 2005).

Dmitriy ve Belinsky (2015) düşük-Poisson ışığı kullanarak kuantum görünümü elde etme ve bu görüntüleri ölçüm azaltma yöntemiyle işleyerek süper-çözünürlük elde etme üzerinde çalışmışlardır. Sapmalar ve kırınım nedeniyle geometri yasalarına göre oluşan görüntülerin ideal olmadığı belirtilmiştir. Kırınımın çözünürlüğü sınırlayan bir faktör olduğu ve bunu aşmak için ölçüm azaltma yöntemlerinin kullanılabilmesi belirtilmiştir. Kuantum görüntü düşük-Poisson olarak bilinen özel bir ışık türü kullanılarak oluşturulan görüntülerdir. Bu ışık türü foton sayısındaki dalgalanmaları azaltarak geleneksel monokromatik eş fazlı ışıklara göre daha düşük gürültü görüntüler elde etmeyi sağlar (Kolobov M. I., 2008). Ölçüm azaltma yöntemi, bir ölçüm sisteminin ürettiği verileri, ideal bir ölçüm sisteminin çıktısına en yakın şekilde tahmin etmeye çalışan bir yöntemdir. Bu yöntemde, gerçek bir ölçüm cihazının ürettiği sinyaller, matematiksel algoritmalar aracılığıyla, ideal bir ölçüm cihazının vereceği sinyallere dönüştürülmeye çalışılır. Böylece ölçüm süreçlerindeki gürültü ve hatalar en aza indirilerek en doğru ölçüm yapılması amaçlanmıştır (Balakin & Belinsky, 2015).

Kolkıran ve Agarwal (2018) yaptığı çalışmada, dalga boyu altında çözünürlük elde etmek için bir dipolün yakın alanını kullanma yöntemini incelemiştir. Geleneksel optik görüntüleme (Rayleigh Kriteri) çözünürlük dalga boyunun yarısı ile sınırlıdır. Bu sınırın yakın alan bileşenleri kullanılarak aşılabileceği belirtilmiştir. Açıklığın çok yakınına koyulan dipol tarafından aydınlatılan açıklığın uzak alan çözünürlüğü analiz

edilmiştir. Dipolden yayılan ışığa, hem sönümlü hem de yayılan dalgalar içermektedir. Sönümlü dalgalar, kırımın yoluyla yayılan dalgalara dönüşmekte ve uzak alan çözünürlüğüne katkı sağlamaktadır. Yakın alan olmadan yüksek çözünürlük elde edilemediği ancak dipolün yakın alanı ile birlikte uzak bölgede de yüksek çözünürlük elde edildiği ortaya koyulmuştur (Kolobov M. , 2007). Bu yöntem ile yakın alan tekniklerinin gerektirdiği uç dedektörlerinin kullanılma gereksimi ortadan kaldırılmıştır (Kolkıran & Agarwal, 2018).

Kolkıran (2024) yaptığı çalışmada, Rayleigh Kriteri'ni aşırp süper-çözünürlük elde etmeyi amaçlamıştır. Süper-çözünürlük elde etmek için yakın alan optiği ve kuantum girişim birleştirilerek yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Sönümlü dalga elde etmek için tek foton yayıcı kaynak kullanılmıştır. Sönümlü dalgalar, elektromanyetik spektrumun bir parçası olup, ışık gibi yayılan dalgalardan farklı olarak enerjilerini yayılım yönünde değil, yüzeye dik yönde taşımaktadır. Bu dalgalar, bir ortamın sınırında, ışığın tamamen yansması veya kırılması yerine, yüzeyde hapsolması sonucu oluşmaktadır. Sönümlü dalgalar, yüzeyden uzaklaştıkça üstel olarak azalmakta ve bu nedenle genellikle yalnızca yüzeye çok yakın mesafelerde (dalga boyu mertebesinde) algılanabilmektedir (Kolobov M. , 2007). Ayrıca sönümlü dalgalar, yayılan dalgalardan daha yüksek uzamsal frekansa sahiptir. Bu, onları dalga boyundan daha küçük ayrıntıları görüntülemek için ideal hale getirmektedir. Sönümlü dalgaların yalnızca dalga boyu mesafesinde ölçülebilmesi bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bunu aşmak için yakın alan dedektörleri ve karşılıklılık teoremi kullanılmaktadır. Bu çalışmada karşılıklılık teoremi kullanılmıştır. Yakın alan optik yöntemleri ve karşılıklılık teoremi, sönümlü dalgaların uzak mesafeye taşınması için etkili yöntemler sunmaktadır. Bu yöntemler, sönümlü dalgaların yüksek uzamsal frekans özelliğinden yararlanarak süper çözünürlüklü görüntüleme ve diğer optik uygulamalar için yeni olanaklar oluşturmaktadır. Yakın alan ve kuantum girişimin birlikte oluşturduğu etkinin sadece yakın alan yada sadece kuantum girişimin oluşturduğu etkiden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kaynak ve dedektör sayısı eşit sayıda artırıldığında çözünürlüğün üstel olarak arttığı tespit edilmiştir (Kolkıran, 2024).

Bu tez çalışmasında, süper-çözünürlük (dalga boyu altı çözünürlük) elde etmek için geleneksel görüntülemede kullanılan tek ışık kaynağı ve tek dedektör (kamera) kullanımına alternatif bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemi gerçeklemek için

sayısal hesaplama metodu kullanılarak sistem kurulmuştur. Sistem, monokromatik eş fazlı ışık kaynağı, dairesel açıklık ve dedektör içermektedir. Farklı sayıda kaynak ve dedektör kullanılarak çözünürlük grafikleri elde edilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Kirchhoff kırınım integrali, foton-foton yoğunluk korelasyon algılama yöntemi ve kuantum girişim kullanarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Sonuç olarak kuantum korelasyon özelliğine sahip olmayan bağımsız tek foton kaynakları, çoklu kamera, foton-foton yoğunluk korelasyon algılama yöntemi ve kuantum girişim teknikleri kullanılarak klasik optik çözünürlük limitinin ötesine geçildiği hesaplamalarla gösterilmiştir.

Bu tez çalışması beş ana başlıktan oluşmaktadır. Giriş bölümünde optik bilimindeki tarihsel gelişmeler özet olarak verilmiştir. Klasik optik çözünürlük limiti olarak bilinen Rayleigh Kriteri formülü verilmiş ve parametreleri açıklanmıştır. Literatürde yer alan, süper-çözünürlük elde etme yöntemleri ve uygulanan metotlar belirtilmiştir. Yine bu bölümde tez çalışmasının amacından ve özgün katkılarından bahsedilmiştir. Teze ait diğer başlıklar aşağıdaki şekilde organize edilmiştir.

İkinci bölümde teorik arka plan verilmiştir. Monokromatik eş-fazlı ışık kaynağının elektromanyetik dalga modeli ile avantajları, kullanım gerekçeleri ve en çok kullanılan türleri belirtilmiştir. Işık yoğunluğu hesaplamak için kullanılan Kirchhoff Kırınım İntegrali açıklanmış ve avantajları belirtilmiştir. Kuantum girişim üzerinde durulmuştur. Çoklu algılama sistemi tanımı yapılmış, en çok kullanılan sensörler ve kullanım alanları açıklanmıştır. Foton-foton yoğunluk korelasyon algılama yöntemi belirtilmiştir.

Üçüncü bölümde, hesaplama yöntemleri verilmiştir. Monokromatik eş-fazlı ışık kaynakları, dairesel açıklık ve çoklu algılama sistemleri ile kurulan üç farklı sistemin görselleri verilmiş ve sistem parametrelerinin tanımları yapılmıştır. Sayısal hesaplamalar için geliştirilen kodlar verilmiş, kullanılan metot ve hesaplama yöntemleri açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, tartışmaya ter verilmiştir. Elde edilen çözünürlük ile klasik optik çözünürlük limitleri karşılaştırılmıştır. Sayısal hesaplama metodları kullanılarak elde edilen grafikler incelenmiş ve analiz edilmiştir. Araştırmanın sınırlamaları ve olası hata kaynakları belirtilmiştir. Gelecekte yapılabilecek araştırma ve önerilere yer verilmiştir.

Beşinci bölümde, araştırmanın kısa bir özeti ve ana bulgular verilmiştir. Araştırmanın sonuçları ve sonuçların önemi belirtilmiştir. Araştırmanın bilimsel ve teknolojik katkısı ifade edilmiştir.



Bölüm 2

Teorik Arka Plan

Bu bölümde, sayısal hesaplamaların temelinde yer alan bilimsel ifadeler açıklanmıştır. Formüller verilmiş, formülleri oluşturan değişkenler ifade edilmiştir.

2.1 Monokromatik Eş-fazlı Işık Kaynakları

Monokromatik eş fazlı ışık kaynakları, sabit dalga boyu, frekans ve genliğe sahiptirler. Dalgalar arasında faz farkı yoktur, dalgalar eş-fazlıdır ve düşük spektral genişliğe sahiptir.

Monokromatik eş-fazlı ışık kaynakları bir elektromanyetik dalgadır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$E(r, t) = E_0 * \cos(kr - \omega t + \emptyset) \quad (2.1)$$

$E(r, t)$: ışığın elektrik alanının uzay ve zamandaki değişimi

E_0 : ışığın genliği

k : dalga vektörü

ω : açısal frekans

t : zaman çarpanı

\emptyset : faz farkı

İki farklı elektromanyetik dalga, k ve \emptyset değerleri eşit olması durumunda monokromatik eş-fazlı olarak tanımlanır (Ersoy, 2007). Bu tür dalga üreten kaynaklara ise monokromatik eş-fazlı ışık kaynakları denir. Bu tür dalgalar, dalga formu bozulmadan uzun mesafeler taşınabilirler. Lazerler ve mikrodalgalar en yaygın olarak bilinen monokromatik eş-fazlı ışık kaynaklarıdır.

2.2 Kirchhoff Kırınım İntegrali

Kirchhoff kırınım integralinin temeli, Huygens-Fresnel prensibine dayanır. Bu prensibe göre, bir dalga cephesindeki her nokta, ikincil dalgacıkların kaynağı olarak düşünülebilir. Bu ikincil dalgacıklar, birbirleriyle etkileşerek yeni bir dalga gibi davranırlar ve kırınım desenini oluştururlar. Kirchhoff kırınım integrali, dalga yayılımını karakterize etmek için Helmholtz denkleminin Green fonksiyonu kullanılarak bir integral denkleme dönüşmesi ile ortaya çıkar (Lytle, 1999). Bu sayede kırınım, matematiksel olarak ifade edilebilir ve açıklıktan geçen ışığın karmaşık genliğini hesaplanabilir.

Helmholtz denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\nabla^2 G(r) + k^2 G(r) = 0 \quad (2.2)$$

Green fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$G(r) = \frac{e^{jkr}}{r} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3), denklem (2.2)'de yerine koyulduğunda Kirchhoff kırınım integrali aşağıdaki şekilde elde edilir (Ersoy, 2007).

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \iint [U(Q) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{ikr}}{r} \right) - \frac{\partial U(Q)}{\partial n} \frac{e^{ikr}}{r}] dS \quad (2.4)$$

$U(P)$: Gözlem noktasındaki (P) ışık kaynağının genliği

$U(Q)$: Açıklık üzerindeki (S) herbir noktanın (Q) dalga fonksiyonu

k : Dalga vektörü

r : Kaynak noktası Q ile gözlem noktası P arasındaki mesafe

$\frac{\partial}{\partial n}$: Yüze normal doğrultudaki türev

dS : Açıklık üzerindeki sonsuz küçük yüzük elemanı

2.3 Çoklu Algılama Sistemi

Çoklu algılama sistemi, süper çözünürlüklü görüntüleme elde etmek için birden fazla dedektörün kullanıldığı bir sistemdir. Süper-çözünürlük elde etmek için korelasyonlu ölçümler yapabilen çok sayıda bağımsız yayıcı ve dedektörün kullanıldığı bir sistem önerilmektedir.

Sistem, birbirine yakın konumlandırılmış iki veya daha fazla tek foton yayıcı kullanmaktadır. Yayıcılar, bir lazer darbesiyle uyarılmakta ve fotonları kendiliğinden yaymaktadır. Yayılan fotonlar, yayıcılar ve dedektörler arasına yerleştirilmiş bir açıklık dizisi tarafından kırınımına uğratılmaktadır. Uzak alana yerleştirilmiş birden fazla dedektör, kırınımına uğramış fotonları algılamaktadır. Dedektörler tarafından aynı anda ve aynı şiddette algılanan fotonlar, foton-foton korelasyon hesabı yapılarak sinyal üretmektedir (Kolkıran, 2024).

Çoklu algılama sistemleri, tarama tip dedektörlere ihtiyaç duymaması, dolanık fotonlar gerektirmemesi ve hem yakın alan hem de kuantum etkilerinden yararlanması bakımından avantaja sahiptir.

2.4 Foton-Foton Yoğunluk Korelasyon Algılama Yöntemi

Foton-foton korelasyonu, iki veya daha fazla fotonun davranışları arasındaki istatistiksel ilişkiyi ifade eder. Bu ilişki, fotonların aynı anda yayılma zamanı, polarizasyon durumu veya uzamsal konumları gibi çeşitli faktörlere bağlı olabilir.

Kuantum görüntüleme, foton-foton korelasyonları, klasik optik sınırlarının ötesine geçen ve süper çözünürlük olarak bilinen artırılmış çözünürlük elde etmek için kullanılabilir. Foton-foton korelasyonları, iki temel mekanizma aracılığıyla süper çözünürlüğe katkıda bulunabilir.

İki veya daha fazla foton kaynağı kullanıldığında, fotonların algılayıcılara ulaşabileceği birden fazla yol ortaya çıkar. Bu yolların ayırt edilemezliği kuantum girişimi meydana getirir (Lemos vd, 2014). Kuantum girişim ile klasik kırınım sınırının ötesine geçerek süper çözünürlük elde edilir. Foton-foton korelasyonu ile nesne ile etkileşime giren fotonlar yakalanarak görüntü elde edilir.

Yakın alan optiğinde ise yakın alan, bir ışık kaynağının dalga boyundan daha kısa mesafelerdeki elektromanyetik alanıdır. Bu alan, sönümlü dalgalar olarak bilinen, klasik kırınım sınırının ötesinde bilgi taşıyabilen yüksek uzamsal frekans bileşenleri içerir. Foton-foton korelasyonları, bu sönümlü dalgalardan gelen bilgileri yakalamak ve süper çözünürlüklü görüntüler oluşturmak için kullanılabilir.

Tek monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki dairesel açıklık ve tek dedektörlü bir sistem için foton-foton yoğunluk korelasyon fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$G^{(1)} = |U(r_1, R_1)|^2 \quad (2.5)$$

İki monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki dairesel açıklık ve iki dedektörlü bir sistem için foton-foton yoğunluk korelasyon fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$G^{(2)} = |U(r_1, R_1) * U(r_2, R_2) + U(r_1, R_2) * U(r_2, R_1)|^2 \quad (2.6)$$

Dört monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki dairesel açıklık ve dört dedektörlü bir sistem için foton-foton yoğunluk korelasyon fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}
& U(r_1, R_1) * U(r_2, R_2) * U(r_3, R_3) * U(r_4, R_4) + \\
& U(r_1, R_1) * U(r_2, R_2) * U(r_3, R_4) * U(r_4, R_3) + \\
& U(r_1, R_1) * U(r_2, R_3) * U(r_3, R_2) * U(r_4, R_4) + \\
& U(r_1, R_1) * U(r_2, R_3) * U(r_3, R_4) * U(r_4, R_2) + \\
& U(r_1, R_1) * U(r_2, R_4) * U(r_3, R_2) * U(r_4, R_3) + \\
& U(r_1, R_1) * U(r_2, R_4) * U(r_3, R_3) * U(r_4, R_2) + \\
& U(r_1, R_2) * U(r_2, R_1) * U(r_3, R_3) * U(r_4, R_4) + \\
& U(r_1, R_2) * U(r_2, R_1) * U(r_3, R_4) * U(r_4, R_3) + \\
& U(r_1, R_2) * U(r_2, R_4) * U(r_3, R_1) * U(r_4, R_3) + \\
& U(r_1, R_2) * U(r_2, R_4) * U(r_3, R_3) * U(r_4, R_1) + \\
& U(r_1, R_2) * U(r_2, R_3) * U(r_3, R_1) * U(r_4, R_4) + \\
& U(r_1, R_2) * U(r_2, R_3) * U(r_3, R_4) * U(r_4, R_1) + \\
G^{(4)} = & U(r_1, R_3) * U(r_2, R_2) * U(r_3, R_1) * U(r_4, R_4) + \\
& U(r_1, R_3) * U(r_2, R_2) * U(r_3, R_4) * U(r_4, R_1) + \\
& U(r_1, R_3) * U(r_2, R_1) * U(r_3, R_2) * U(r_4, R_4) + \\
& U(r_1, R_3) * U(r_2, R_1) * U(r_3, R_4) * U(r_4, R_2) + \\
& U(r_1, R_3) * U(r_2, R_4) * U(r_3, R_1) * U(r_4, R_2) + \\
& U(r_1, R_3) * U(r_2, R_4) * U(r_3, R_2) * U(r_4, R_1) + \\
& U(r_1, R_4) * U(r_2, R_2) * U(r_3, R_3) * U(r_4, R_1) + \\
& U(r_1, R_4) * U(r_2, R_2) * U(r_3, R_1) * U(r_4, R_3) + \\
& U(r_1, R_4) * U(r_2, R_1) * U(r_3, R_2) * U(r_4, R_3) + \\
& U(r_1, R_4) * U(r_2, R_1) * U(r_3, R_3) * U(r_4, R_2) + \\
& U(r_1, R_4) * U(r_2, R_3) * U(r_3, R_1) * U(r_4, R_2) + \\
& U(r_1, R_4) * U(r_2, R_3) * U(r_3, R_2) * U(r_4, R_1)
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Sonuç olarak, foton-foton korelasyonu, kuantum görüntülemeye süper çözünürlük elde etmek için güçlü bir araçtır. Kuantum girişiminden yararlanarak, klasik optik sınırlarının ötesinde görüntü çözünürlüğü elde etmek mümkündür (Kolkıran, 2024).

Bölüm 3

Hesaplama Yöntemleri

Bu bölüm içerisinde, süper-çözünürlük elde etmek için kurulan sistemlerin görselleri verilmiş ve sistem parametleri açıklanmıştır. Kurulan sistemleri analiz etmek için Mathematica programında sayısal hesaplama metodları kullanılmıştır. Gerekli hesaplamalar için kullanılan metot ve hesaplama yöntemleri belirtilmiştir.

3.1 Tek Işık Kaynağı ve Tek Dedektör ile Sistem-1

Sistem-1, bir monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki eş dairesel açıklık ve bir dedektör içermektedir. Sistemde yatay eksen z-ekseni, dikey eksen x-ekseni ve sayfanın içine doğru olan eksen ise y-eksenidir. Işık kaynağı $(0, 0, -z)$ noktasına yerleştirilmiş ve koordinat sisteminde (R_x, R_y, R_z) genel ifadesi ile gösterilmiştir. İki eş dairesel açıklık, merkezleri $(x, 0, 0)$ ve $(-x, 0, 0)$ noktalarına gelecek şekilde yerleştirilmiş ve koordinat sisteminde $(ax, ay, 0)$ genel ifadesi ile gösterilmiştir. $y=0$ ve z-ekseninde belirli bir konumda yer alan dedektör, x-ekseni boyunca belirlenen aralıkta tarama yapmaktadır ve koordinat sisteminde (r_x, r_y, r_z) genel ifadesi ile gösterilmiştir.

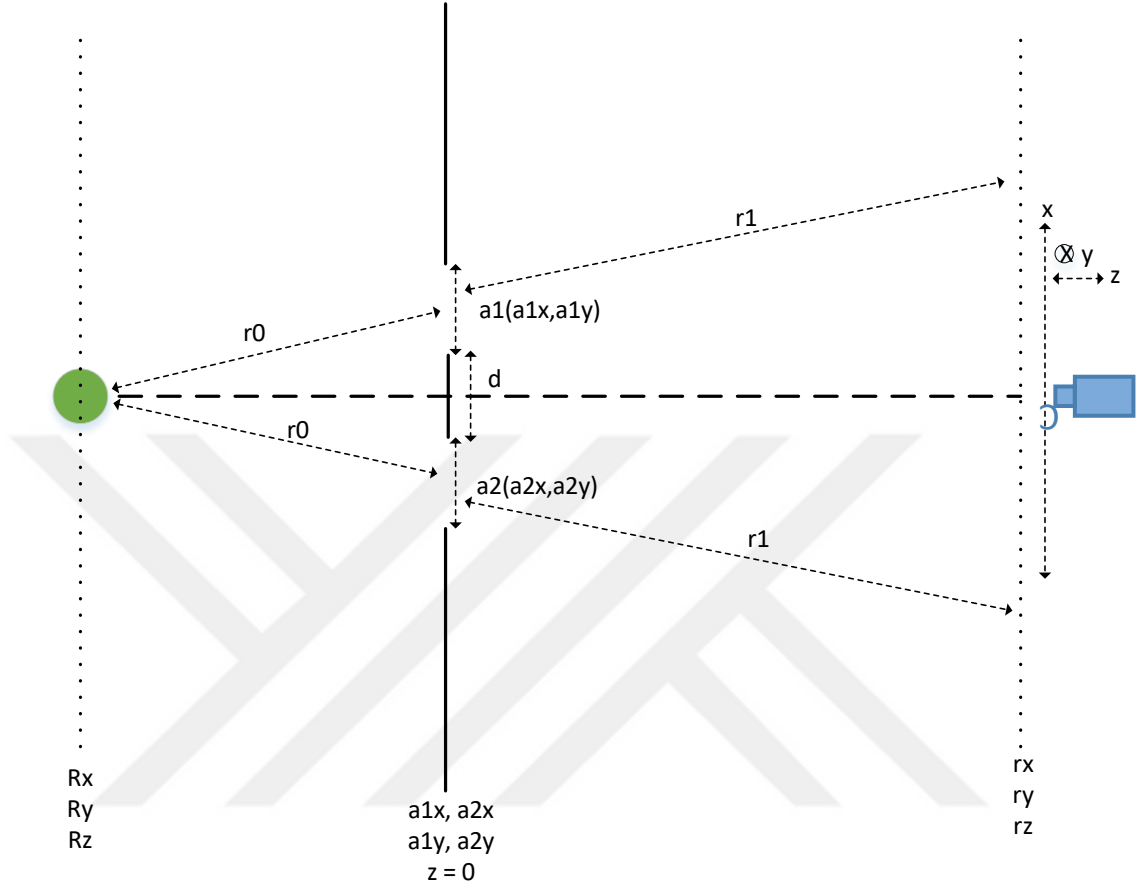
a : Dairesel açıklıkların yarıçapı

d : Dairesel açıklıklar arasındaki minimum mesafe

r_0 : Işık kaynağı ve dairesel açıklık arasındaki mesafe

r_1 : Dairesel açıklık ve dedektör arasındaki mesafe

Sistem-1'in Microsoft Visio programında oluşturulan görseli aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.1: Bir monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki eş dairesel açıklık ve bir dedektör içeren sistem

Fotonların dedektörde oluşturdukları genlik, Kirchhoff kırınım integrali ile hesaplanmıştır. Sistemi modellemek için geliştirilen sayısal hesaplama kodu aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \text{UMHF2circ}[rx_ , ry_ , rz_ , Rx_ , Ry_ , Rz_ , a_ , \lambda_ , d_ , \text{max_}] \\
& := \text{NIntegrate}\left[\frac{\text{Exp}\left[i\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\sqrt{(Rx-ax)^2+(Ry-ay)^2+Rz^2}}{\sqrt{(rx-ax)^2+(ry-ay)^2+rz^2}}\right)\right]}{\left(\frac{\sqrt{(Rx-ax)^2+(Ry-ay)^2+Rz^2}}{\sqrt{(rx-ax)^2+(ry-ay)^2+rz^2}}\right)}\right] \\
& * \text{Boole}[(ax-a-d/2)^2+(ay)^2 \\
& \leq a^2] | [(ax+a+d/2)^2+(ay)^2 \\
& \leq a^2], \{ax, -a-a-d/2, a+a \\
& +d/2\}, \{ay, -a, a\}, \text{MaxRecursion} \rightarrow \text{max}];
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Foton-foton yoğunluk korelasyon yöntemi ile dedektörde oluşan yoğunluk hesaplanmıştır. Sistem-1 için bir fotonun aynı anda izleyebileceği yalnız bir yol vardır. Denklem (2.5) aşağıdaki şekilde sayısal metodlar kullanılarak kodlanmıştır.

$$\begin{aligned}
& \text{IMHF1atom2circ1det}[r1x_ , r1y_ , r1z_ , R1x_ , R1y_ , R1z_ , a_ , \lambda_ , d_ , \\
& \text{max_}] := \\
& \text{Abs}[\text{UMHF2circ}[r1x, r1y, r1z, R1x, R1y, R1z, a, \lambda, d, \text{max}]]^2;
\end{aligned} \tag{3.2}$$

3.2 İki Işık Kaynağı ve İki Dedektör ile Sistem-2

Sistem-2, iki monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki eş dairesel açıklık ve iki dedektör içermektedir. Sistemde yatay eksen z-ekseni, dikey eksen x-ekseni ve sayfanın içine doğru olan eksen ise y-eksenidir. Işık kaynakları $(x, 0, -z)$ ve $(-x, 0, z)$ noktalarına yerleştirilmiş ve koordinat sisteminde $(R1x, R1y, R1z)$ ve $(R2x, R2y, R2z)$ genel ifadesi ile gösterilmiştir. İki eş dairesel açıklık, merkezleri $(x, 0, 0)$ ve $(-x, 0, 0)$ noktalarına gelecek şekilde yerleştirilmiş ve koordinat sisteminde $(ax, ay, 0)$ genel ifadesi ile gösterilmiştir. $y=0$ ve z-ekseninde belirli bir konumda yer alan dedektörler simetrik olarak x-ekseni boyunca belirlenen aralıkta tarama yapmaktadır ve koordinat sisteminde $(r1x, r1y, r1z)$ ve $(r2x, r2y, r2z)$ genel ifadesi ile gösterilmiştir.

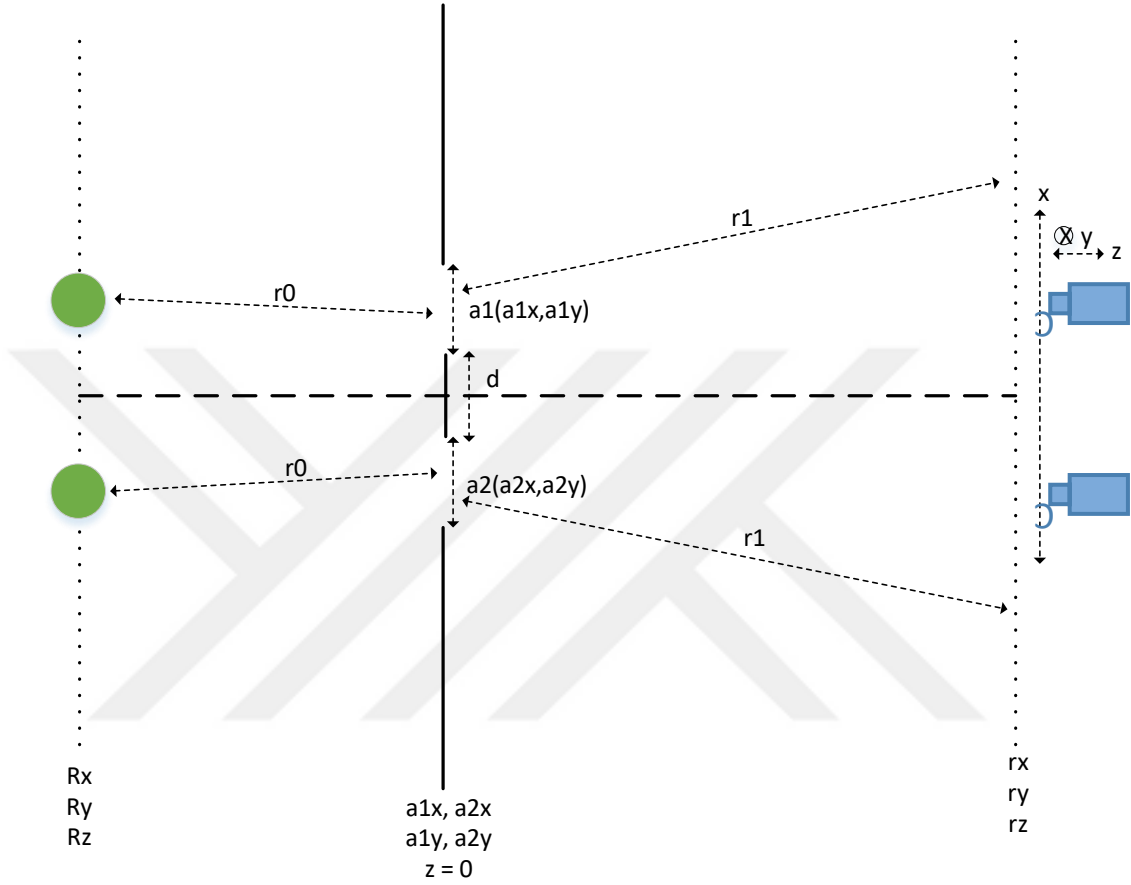
a : Dairesel açıklıkların yarıçapı

d : Dairesel açıklıklar arasındaki minimum mesafe

r0 : Işık kaynağı ve dairesel açıklık arasındaki mesafe

r_1 : Dairesel açıklık ve dedektör arasındaki mesafe

Sistem-2'nin Microsoft Visio programında oluşturulan görseli aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.2: İki monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki eş dairesel açıklık ve iki dedektör içeren sistem

Fotonların dedektörde oluşturdukları genlik Kirchhoff Kırınım İntegrali ile hesaplanmıştır. Sistemi modellemek için geliştirilen sayısal hesaplama kodu aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \text{UMHF2circ}[rx_ , ry_ , rz_ , Rx_ , Ry_ , Rz_ , a_ , \lambda_ , d_ , \text{max_}] \\
& := \text{NIntegrate}\left[\frac{\text{Exp}\left[i\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\sqrt{(Rx-ax)^2+(Ry-ay)^2+Rz^2}}{\sqrt{(rx-ax)^2+(ry-ay)^2+rz^2}}\right)\right]}{\left(\frac{\sqrt{(Rx-ax)^2+(Ry-ay)^2+Rz^2}}{\sqrt{(rx-ax)^2+(ry-ay)^2+rz^2}}\right)}\right] \quad (3.3) \\
& * \text{Boole}[(ax-a-d/2)^2+(ay)^2 \\
& \leq a^2 \mid (ax+a+d/2)^2+(ay)^2 \\
& \leq a^2], \{ax, -a-a-d/2, a+a \\
& +d/2\}, \{ay, -a, a\}, \text{MaxRecursion} \rightarrow \text{max};
\end{aligned}$$

Foton-foton yoğunluk korelasyon yöntemi ile iki ışık kaynağından çıkan fotonların iki açıklıktan geçerek iki dedektöre ulaşma olasılıkları kullanılarak dedektörde oluşan yoğunluk hesaplanmıştır. Sistem-2 için bir fotonun aynı anda izleyebileceği iki farklı yol vardır. Denklem (2.6) aşağıdaki şekilde kodlanmıştır.

```

UMHF2atom1circ2det[r1x_, r1y_, r1z_, R1x_, R1y_, R1z_,
r2x_, r2y_, r2z_, R2x_, R2y_, R2z_, a_, λ_, max_] :=
Abs[(UMHF1circ[r1x, r1y, r1z, R1x, R1y, R1z, a, λ, max]
* UMHF1circ[r2x, r2y, r2z, R2x, R2y, R2z, a, λ, max] +
UMHF1circ[r1x, r1y, r1z, R2x, R2y, R2z, a, λ, max]
* UMHF1circ[r2x, r2y, r2z, R1x, R1y, R1z, a, λ, max])]^2;

```

3.3 Dört Işık Kaynağı ve Dört Dedektör ile Sistem-3

Sistem-3, dört monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki eş dairesel açıklık ve dört dedektör içermektedir. Sistemde yatay eksen z-ekseni, dikey eksen x-ekseni ve sayfanın içine doğru olan eksen ise y-eksenidir. Işık kaynakları (x, 0, -z) ve (-x, 0, z) noktalarına simetrik olarak yerleştirilmiş ve koordinat sisteminde (R1x, R1y, R1z), (R2x, R2y, R2z), (R3x, R3y, R3z), (R4x, R4y, R4z) genel ifadesi ile gösterilmiştir. İki eş dairesel açıklık, merkezleri (x, 0, 0) ve (-x, 0, 0) noktalarına gelecek şekilde yerleştirilmiş ve koordinat sisteminde (ax, ay, 0) genel ifadesi ile gösterilmiştir. y=0 ve z-ekseninde belirli bir konumda yer alan dedektörler simetrik olarak x-ekseni boyunca belirlenen aralıkta tarama yapmaktadır ve koordinat sisteminde (r1x, r1y, r1z), (r2x, r2y, r2z), (r3x, r3y, r3z), (r4x, r4y, r4z) genel ifadesi ile gösterilmiştir.

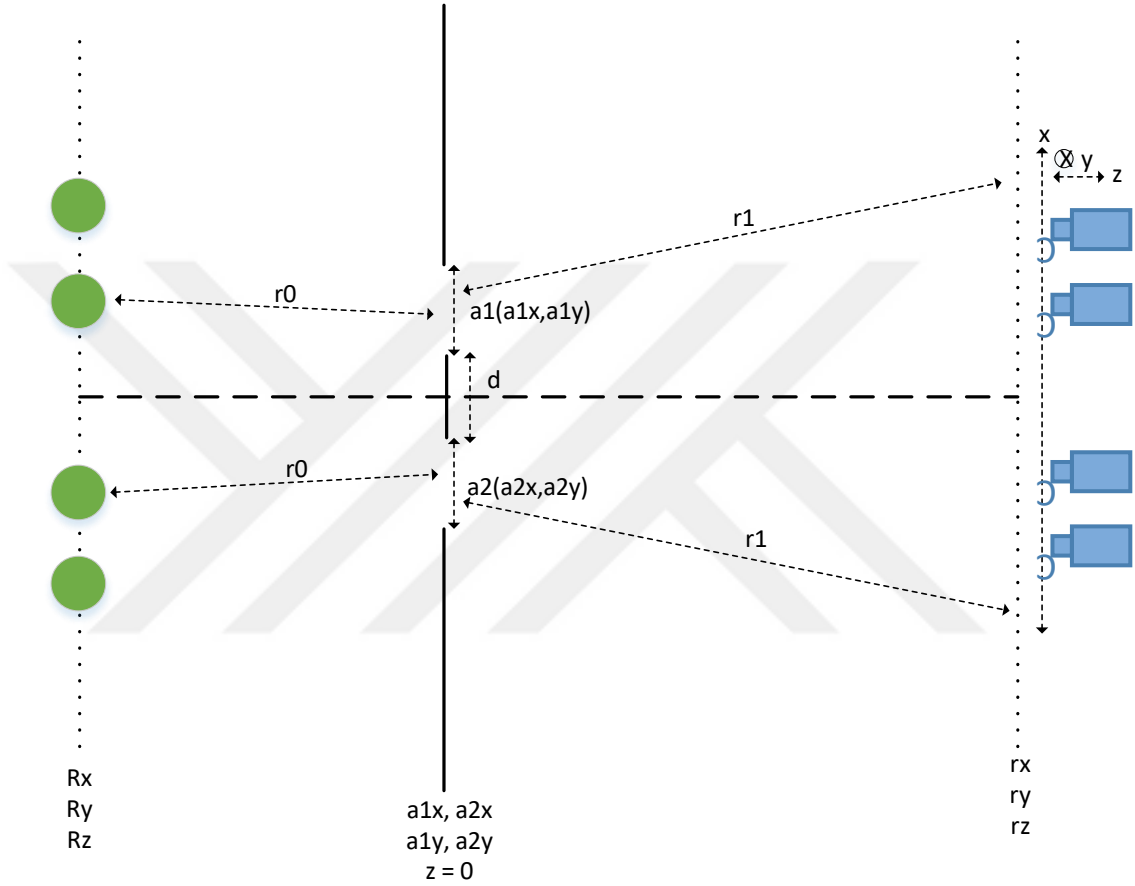
a : Dairesel açıklıkların yarıçapı

d : Dairesel açıklıklar arasındaki minimum mesafe

r_0 : Işık kaynağı ve dairesel açıklık arasındaki mesafe

r_1 : Dairesel açıklık ve dedektör arasındaki mesafe

Kurulan sistemin visio ortamında çizimi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.3: Dört monokromatik eş-fazlı ışık kaynağı, iki eş dairesel açıklık ve dört dedektör içeren sistem

Fotonların dedektörde oluşturdukları genlik Kirchhoff kırınım integrali ile hesaplanmıştır. Sistemi modellemek için geliştirilen sayısal hesaplama kodu aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \text{UMHF2circ}[rx_ , ry_ , rz_ , Rx_ , Ry_ , Rz_ , a_ , \lambda_ , d_ , \text{max}_] \\
& := \text{NIntegrate}\left[\frac{\text{Exp}\left[i\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\sqrt{(Rx-ax)^2+(Ry-ay)^2+Rz^2}}{\sqrt{(rx-ax)^2+(ry-ay)^2+rz^2}}\right)\right]}{\left(\frac{\sqrt{(Rx-ax)^2+(Ry-ay)^2+Rz^2}}{\sqrt{(rx-ax)^2+(ry-ay)^2+rz^2}}\right)}\right] \quad (3.5) \\
& * \text{Boole}[(ax-a-d/2)^2+(ay)^2 \\
& \leq a^2 \mid (ax+a+d/2)^2+(ay)^2 \\
& \leq a^2], \{ax, -a-a-d/2, a+a \\
& +d/2\}, \{ay, -a, a\}, \text{MaxRecursion} \rightarrow \text{max};
\end{aligned}$$

Foton-foton yoğunluk korelasyon yöntemi ile dört ışık kaynağından çıkan fotonların iki açıklıktan geçerek dört dedektöre ulaşma olasılıkları kullanılarak dedektörde oluşan yoğunluk hesaplanmıştır. Sistem-3 için bir fotonun aynı anda izleyebileceği 24 farklı yol vardır. Denklem (2.7) aşağıdaki şekilde kodlanmıştır.

Bölüm 4

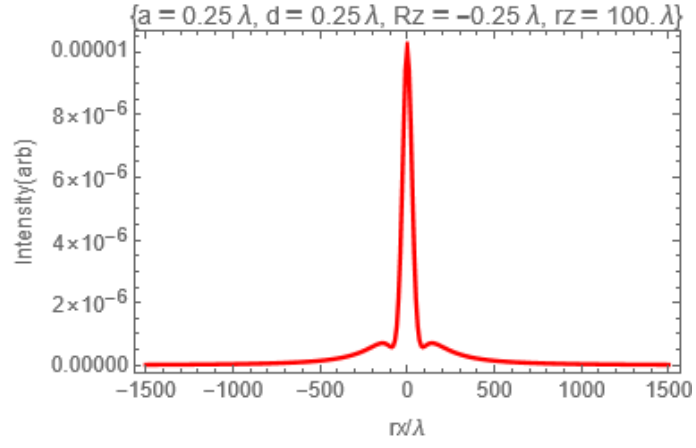
Analiz ve Tartışma

Bu bölümde, yüksek çözünürlük elde etmek için tasarlanan sistemler ile elde edilen çözünürlük grafikleri ve görüntüler verilmiştir. Araştırmanın sınırlamaları ve olası hata kaynakları belirtilerek, gelecek araştırma önerileri paylaşılmıştır.

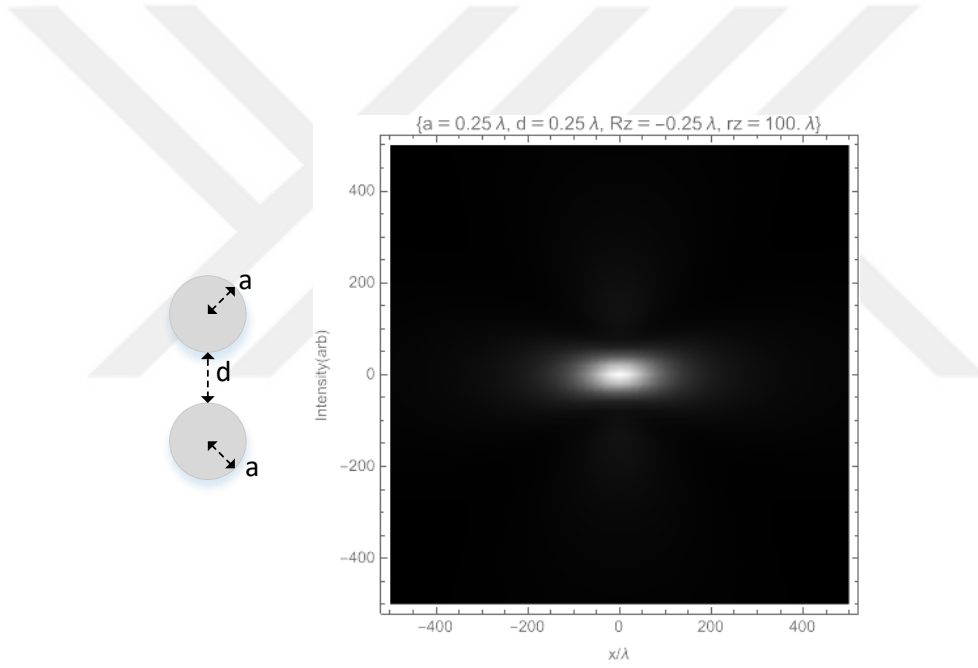
4.1 Analiz

Bölüm 3'te belirtilen Sistem-1, Sistem-2 ve Sistem-3'te kullanılan tüm parametreler, analiz kolaylığı sağlaması için λ cinsinden verilmiştir. Ayrıca daha doğru karşılaştırma yapmak için tüm sistemlerde dairesel açıklık yarı çapı, açıklıklar arası uzaklık, kaynağın açıklığa uzaklığı ve dedektörün açıklığa uzaklığı için aynı değerler kullanılmıştır. İki ışık kaynağı ve iki dedektör ile dört ışık kaynağı ve dört dedektör içeren sistemlerde, ışık kaynakları ve dedektörler z-ksenine simetrik ve $y=0$ olacak şekilde yerleştirilmiştir. Tüm sistemlerde dairesel açıklıklar z-ksenine simetrik ve $y=0$ olacak şekilde yerleştirilmiştir.

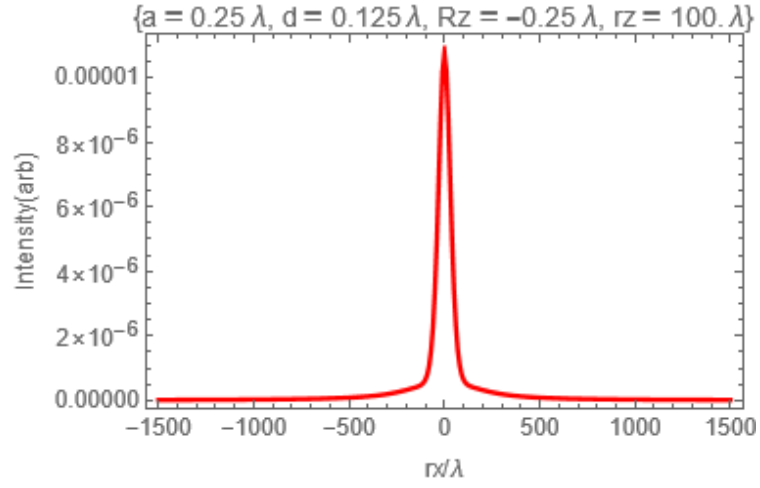
Tek ışık kaynağı, iki dairesel açıklık ve tek dedektör içeren Sistem-1'de, sayısal hesaplama metodları ile yapılan hesaplamalar sonucunda aşağıdaki yoğunluk grafikleri ve 2B görüntüler elde edilmiştir.



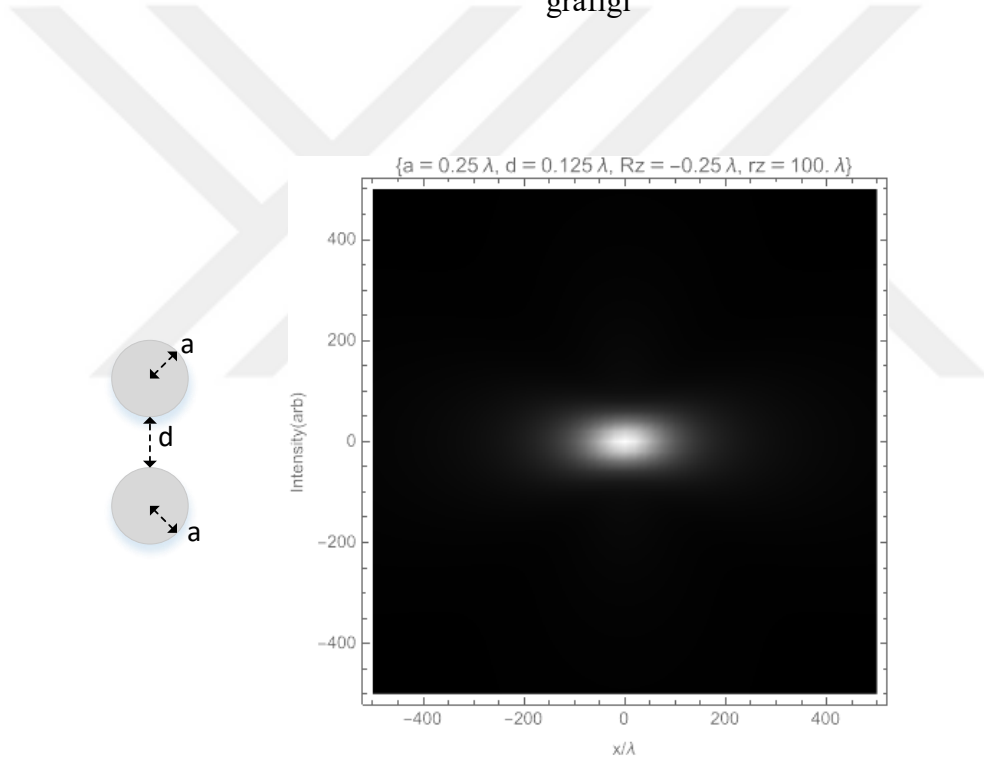
Şekil 4.1: $a=0.25\lambda$, $d=0.25\lambda$, $R_z=-0.25\lambda$, $r_z=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği



Şekil 4.2: Dairesel yarıkların 2B çizimi (solda) ve $a=0.25\lambda$, $d=0.25\lambda$, $R_z=-0.25\lambda$, $r_z=100\lambda$ için dedektör üzerinde elde edilen 2B görüntü (sağda)

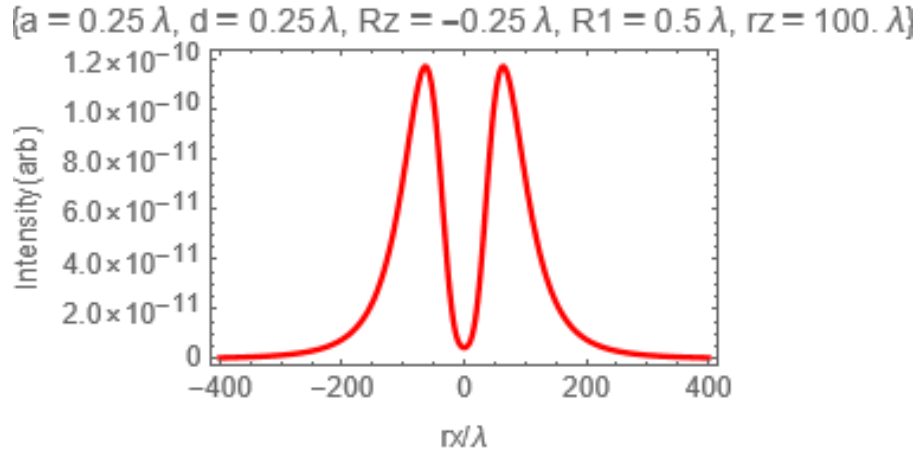


Şekil 4.3: $a=0.25\lambda$, $d=0.125\lambda$, $Rz=-0.25\lambda$, $rz=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği

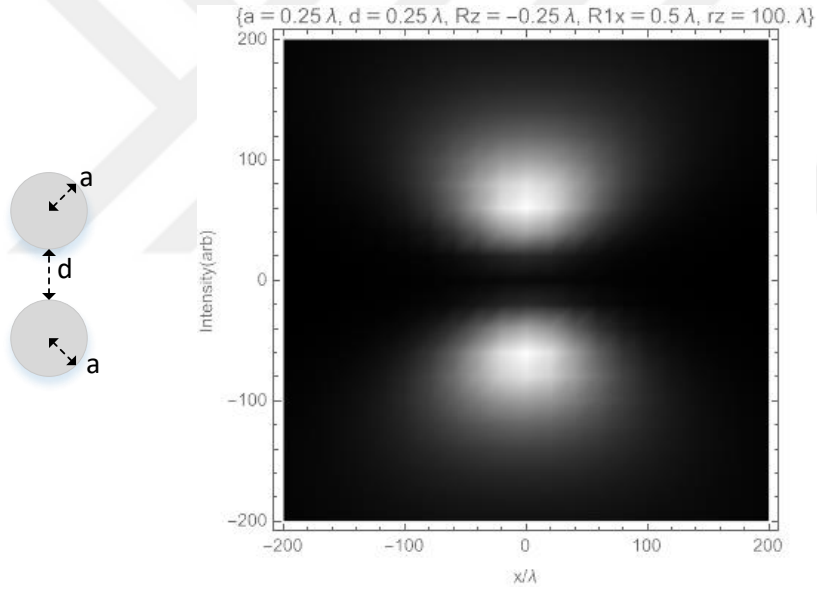


Şekil 4.4: Dairesel yarıkların 2B çizimi (solda) ve $a=0.25\lambda$, $d=0.125\lambda$, $Rz=-0.25\lambda$, $rz=100\lambda$ için dedektör üzerinde elde edilen 2B görüntü (sağda)

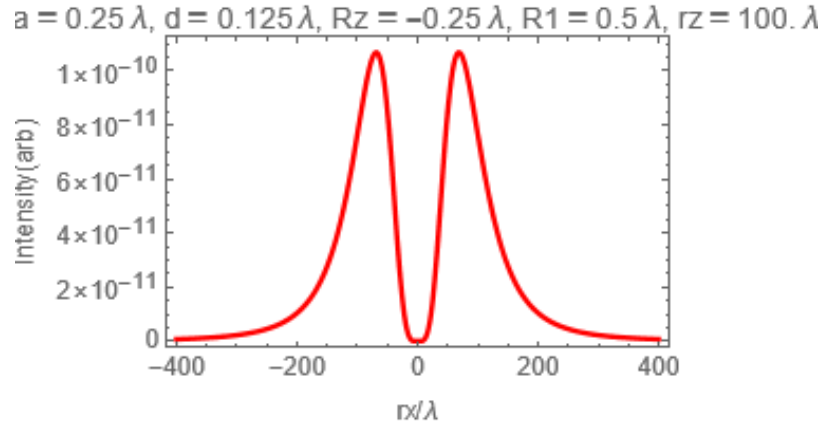
İki ışık kaynağı, iki dairesel açıklık ve iki dedektör içeren Sistem-2’de, sayısal hesaplama metodları ile yapılan hesaplamalar sonucunda aşağıdaki yoğunluk grafikleri ve 2B görüntüleri elde edilmiştir.



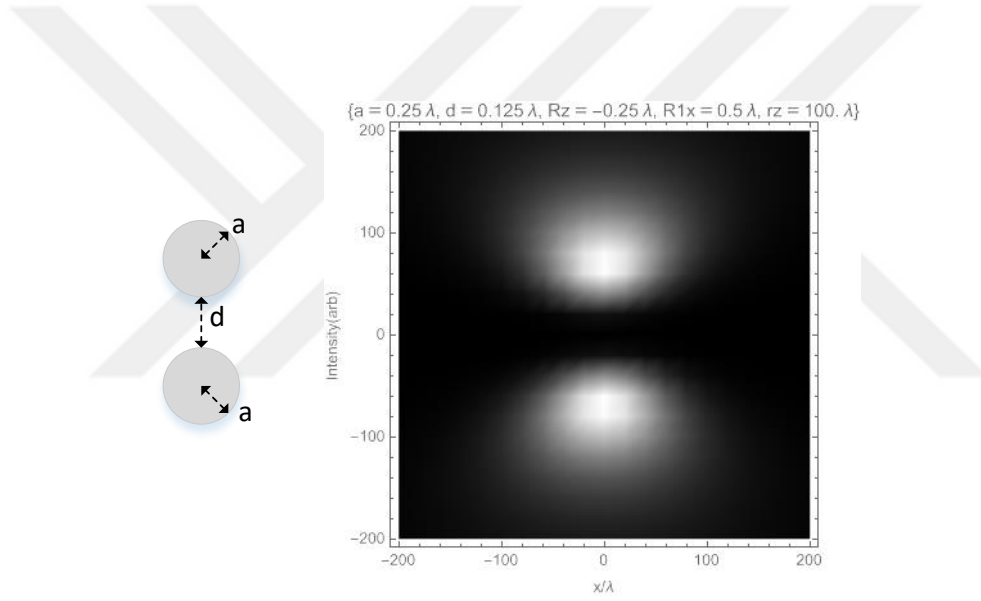
Şekil 4.5: $a=0.25\lambda$, $d=0.25\lambda$, $R_{1z}=R_{2z}=-0.25\lambda$, $R_{1x}=0.5\lambda$, $R_{2x}=-0.5\lambda$, $r_z=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği



Şekil 4.6: Dairesel yarıkların 2B çizimi (solda) ve $a=0.25\lambda$, $d=0.25\lambda$, $R_{1z}=R_{2z}=-0.25\lambda$, $R_{1x}=0.5\lambda$, $R_{2x}=-0.5\lambda$, $r_z=100\lambda$ için dedektörler üzerinde elde edilen 2B görüntü (sağda)

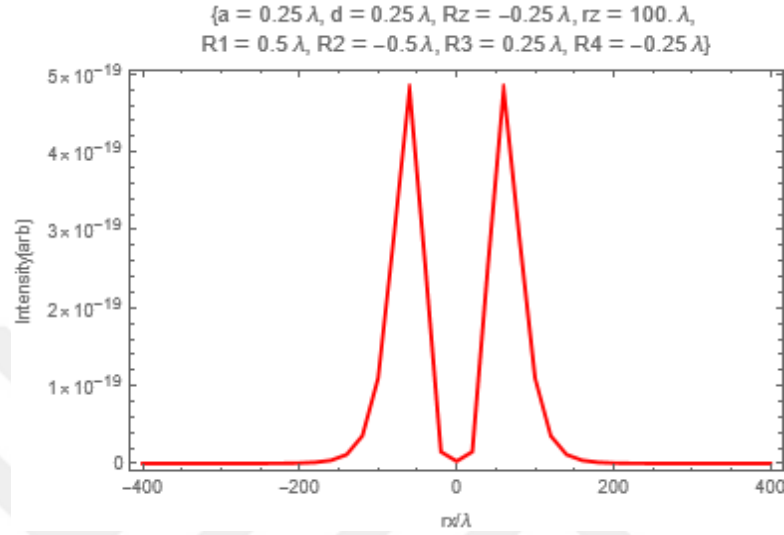


Şekil 4.7: $a=0.25\lambda$, $d=0.125\lambda$, $R_{1z}=R_{2z}=-0.25\lambda$, $R_{1x}=0.5\lambda$, $R_{2x}=-0.5\lambda$, $r_z=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği

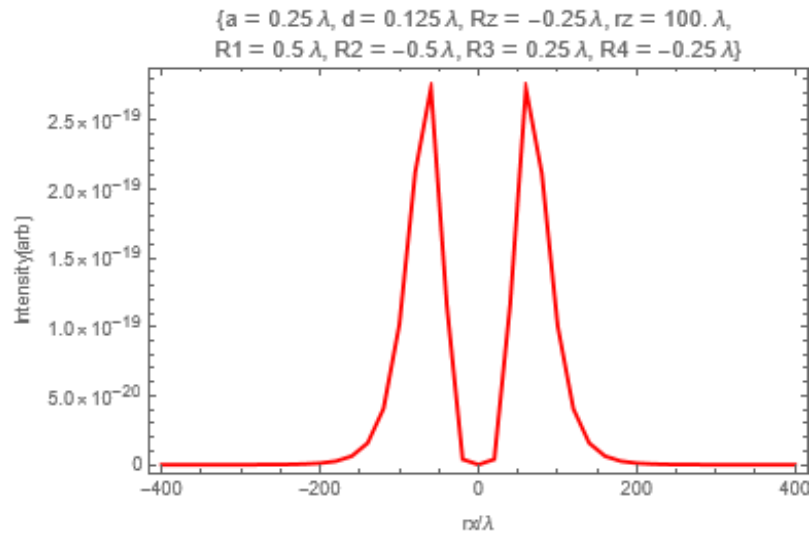


Şekil 4.8: Dairesel yarıkların 2B çizimi (solda) ve $a=0.25\lambda$, $d=0.125\lambda$, $R_{1z}=R_{2z}=-0.25\lambda$, $R_{1x}=0.5\lambda$, $R_{2x}=-0.5\lambda$, $r_z=100\lambda$ için dedektörler üzerinde elde edilen 2B görüntü (sağda)

Dört ışık kaynağı, iki dairesel açıklık ve dört dedektör içeren Sistem-3'te, sayısal hesaplama metodları ile yapılan hesaplamalar sonucunda aşağıdaki yoğunluk grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 4.9: $a=0.25\lambda$, $d=0.25\lambda$, $R_{1z}=R_{2z}=R_{3z}=R_{4z}=-0.25\lambda$, $R_{1x}=0.5\lambda$, $R_{2x}=-0.5\lambda$, $R_{3x}=0.25\lambda$, $R_{4x}=-0.25\lambda$, $r_z=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği



Şekil 4.10: $a=0.25\lambda$, $d=0.125\lambda$, $R_{1z}=R_{2z}=R_{3z}=R_{4z}=-0.25\lambda$, $R_{1x}=0.5\lambda$, $R_{2x}=-0.5\lambda$, $R_{3x}=0.25\lambda$, $R_{4x}=-0.25\lambda$, $r_z=100\lambda$ için dedektörde oluşan yoğunluk grafiği

4.2 Araştırmanın Sınırlamaları ve Olası Hata Kaynakları

Yapılan çalışmada tercih edilen yöntem ya da kullanılan araçlardan kaynaklı bazı sınırlamalar ve hata olasılıkları bulunmaktadır. Çalışmalar, sınırlamalar ve hata olasılıkları göz önünde bulundurularak yapılmış ve sonuçlar bu doğrultuda değerlendirilmiştir. Ayrıca gerekli iyileştirmelerin yapılabileceği yeni araştırmaların önü açılmıştır.

Bölüm 3'te belirtilen Sistem-3'te 2B görüntü oluşturmak için kullanılan algoritma, bilgisayarın işlemci gücü yeterli olmadığı için çalıştırılmamış ve 2B görüntü elde edilememiştir. Fakat elde edilen ışık yoğunluğu grafiği, sonuçları yorumlamak için yeterli olmuştur.

Kirchhoff kırınım integrali, Huygens-Fresnel prensibine dayanır ve bu prensip de yaklaşık bir modeldir. Bu nedenle, Kirchhoff kırınım integrali tam bir çözüm değil, yaklaşık bir çözüm sunmaktadır. Özellikle açıklığın boyutları dalga boyuna yaklaştığında ve ya açıklığın geometrisi karmaşık olduğunda, bu yaklaşıklık bazı hatalara yol açabilmektedir.

Kirchhoff kırınım integralinde kullanılan sınır koşulları, fiziksel olarak tutarsızdır. Örneğin, açıklık üzerindeki ışık alanının ve türevinin aynı anda sıfır olması mümkün değildir. Bu tutarsızlık, bazı durumlarda kırınım deseninin yanlış hesaplanmasına neden olabilmektedir (Ersoy, 2007).

Kirchhoff kırınım integrali, sönümlü dalgaların etkisini hesaba katmamaktadır. Bu durum, yakın alan kırınımı analiz edilirken bazı hatalara neden olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında Kirchhoff kırınım integrali, sınır koşulları ideal kabul edilerek kullanılmıştır. Ayrıca hızlı ve doğru sonuçlar verdiği için tercih edilmiştir. Tercih edilen metod ve hesaplama yöntemi, tezin amacını karşılar niteliktedir.

4.3 Gelecek Araştırma Önerileri

Sayısal hesaplama metodunda ParallelTable fonksiyonu alternatifi kullanılarak, 2B görüntü çözünürlüğünü düşürülerek ya da daha yüksek işlemci gücüne sahip bilgisayar kullanılarak görüntü elde edilebilir.

Kirchhoff kırınım integralinin temeli olan Helmholtz denklemi nümerik analiz yöntemi ile çözülebilir. Helmholtz denklemi daha kesin bir sonuç verebilir ancak bunun için ortam parametrelerinin detaylı bir şekilde tanımlanması ve yüksek işlemci gücüne sahip bilgisayar kullanılması gerekebilir.

Sönümlü dalgaların etkisini tam olarak hesaba katabilen alternatif yöntem olan Rayleigh-Sommerfeld kırınım integralleri kullanılabilir. Rayleigh-Sommerfeld integrali, Kirchhoff kırınım integraline benzer ancak farklı sınır koşulları kullanır. Kirchhoff çözümü, birinci ve ikinci Rayleigh-Sommerfeld çözümlerinin aritmetik ortalamasıdır (Boxem vd, 2013).

Birinci ve ikinci Rayleigh-Sommerfeld integrali aşağıda sırayla verilmiştir.

$$U(P) = \frac{1}{2\pi} \iint U(\mathbf{r}) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{e^{ikr}}{r} \right) dS$$

$$U(P) = \frac{1}{2\pi} \iint \frac{\partial U(\mathbf{r})}{\partial z} \left(\frac{e^{ikr}}{r} \right) dS$$

$U(P)$: Gözlem noktasındaki (P) ışık kaynağının genliği

$U(\mathbf{r})$: Açıklık üzerindeki her bir noktanın dalga fonksiyonu

\mathbf{r} : Dalga fonksiyonu uzay koordinatları

k : Dalga vektörü

r : Kaynak noktası Q ile gözlem noktası P arasındaki mesafe

$\frac{\partial}{\partial z}$: z-ekseni doğrultusundaki türev

dS : Açıklık üzerindeki sonsuz küçük yüzük elemanı

Bölüm 5

Değerlendirme ve Sonuç

Bu tezde, tek ışık kaynağı, iki dairesel açıklık ve tek dedektörden oluşan Sistem-1, iki ışık kaynağı, iki dairesel açıklık ve iki dedektörden oluşan Sistem-2 ile dört ışık kaynağı, iki dairesel açıklık ve dört dedektörden oluşan Sistem-3 kurularak sayısal hesaplamalar yapılmıştır. Sayısal hesaplamalar sonucunda dalga boyuna göre yoğunluk grafikleri elde edilmiştir. Kaynak ve dedektör sayısı aynı oranda artırıldığında çözünürlüğün üstel olarak arttığı gözlenmiştir. Sistemlerden elde edilen çözünürlük grafikleri, kolay karşılaştırma yapabilmek için Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiştir.

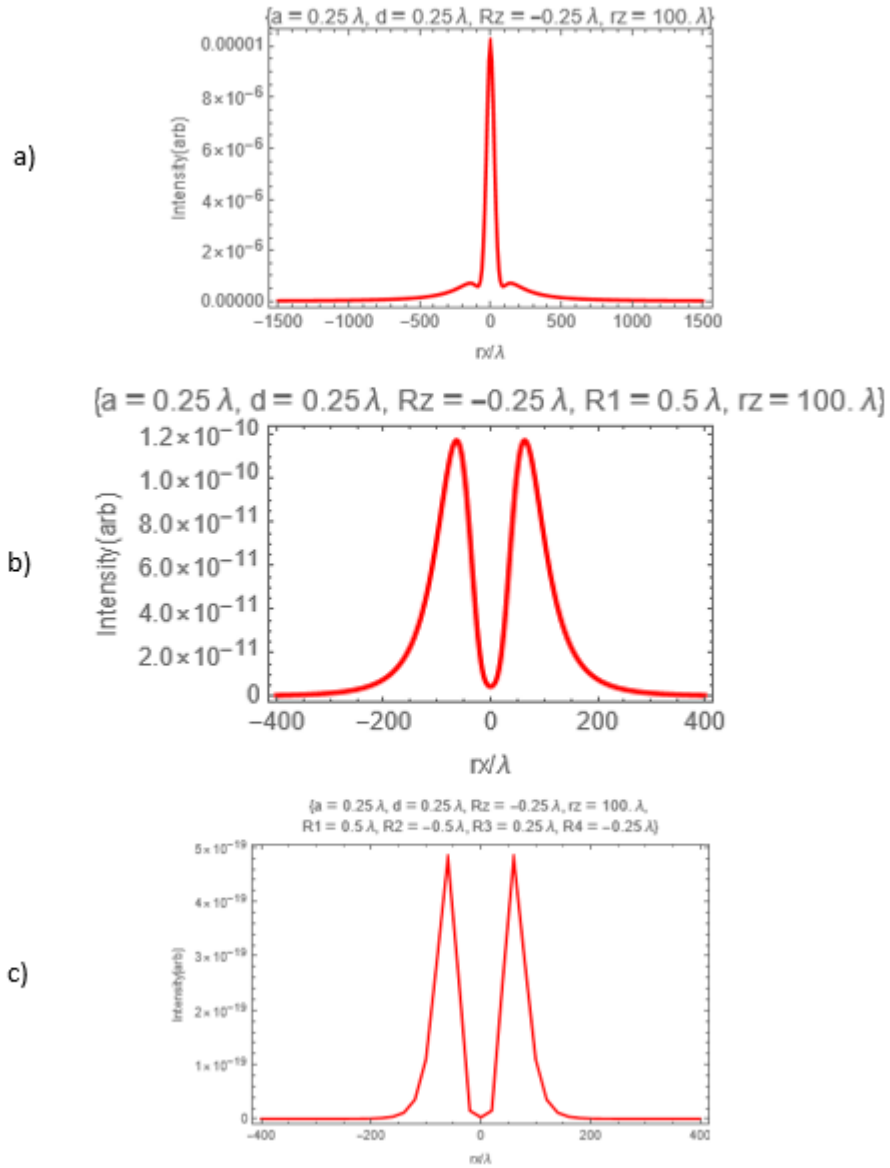
EK-A’da belirtilen Balistika sisteminde çözünürlük dalga boyunun üzerindedir. Balistika sisteminde de kullanılan klasik aydınlatma ve görüntüleme yöntemleri ile yüksek çözünürlük elde edilememektedir. Bu çalışmada önerilen yöntemin Balistika sistemine uygulanması ile yüksek çözünürlük elde edilebileceği görülmektedir.

Tek ışık kaynağı, iki dairesel açıklık ve tek dedektörden oluşan Sistem-1’de elde edilen dalga boyuna göre yoğunluk grafikleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.3’te verilmiştir. Görüldüğü gibi tek ışık kaynağı ve tek dedektör ile iki açıklık ayırt edilememiş, sadece tek bir noktada yoğunluk tepesi oluşmuştur. Ayrıca Şekil 4.2 ve Şekil 4.4’teki 2B görüntülerde de iki dairesel açıklığın tek bir açıklık gibi görüldüğü anlaşılmıştır. Bunun nedeni tek ışık kaynağı ve tek dedektör ile açıklıklar arası mesafe olan $\lambda/4$ çözünürlüğüne ulaşamamasıdır. Diğer bir ifadeyle, klasik optik çözünürlük limiti olan $\lambda/2$ aşılamamıştır.

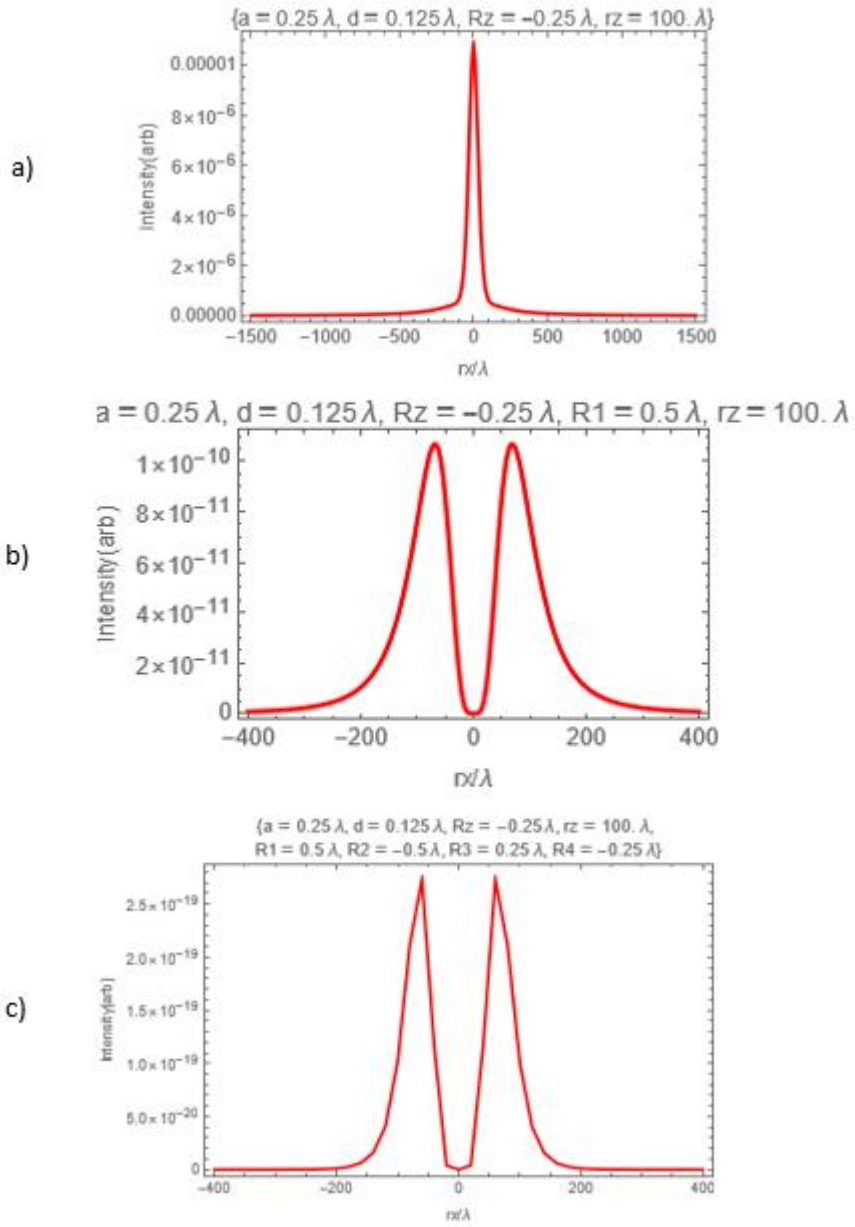
İki ışık kaynağı, iki dairesel açıklık ve iki dedektörden oluşan Sistem-2’de elde edilen dalga boyuna göre yoğunluk grafikleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.7’de verilmiştir. Görüldüğü gibi iki ışık kaynağı ve iki dedektör ile iki açıklık birbirinden ayırt edilmiş, iki noktada

yoğunluk tepesi oluşmuştur. Ayrıca Şekil 4.6 ve Şekil 4.8'deki 2B görüntülerde de iki dairesel açıklığın iki ayrı cisim olarak görüldüğü anlaşılmıştır. Sonuç olarak, açıklıklar arası mesafe olan $\lambda/4$ ve $\lambda/8$ değerinden daha yüksek bir çözünürlük elde edilmiştir. Diğer bir ifadeyle, klasik optik çözünürlük limiti olan $\lambda/2$ aşılmıştır.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da dört ışık kaynağı ve dört dedektör kullanılarak elde edilen dalga boyuna göre yoğunluk grafikleri verilmiştir. Buna göre, grafiklerde birbirinden ayırt edilebilen iki tepe elde edilmiştir. Yani açıklıklar arası mesafeden ($\lambda/4$ ve $\lambda/8$) daha yüksek bir çözünürlük elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'daki grafiklerde oluşan tepelerin Şekil 4.5 ve Şekil 4.7'deki tepelerden daha keskin olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise dört ışık kaynağı ve dört dedektör ile kurulan sistemin çözünürlüğünün iki ışık kaynağı ve iki dedektör ile kurulan sistemin çözünürlüğünden daha yüksek olmasıdır.



Şekil 5.1: Elde Edilen Çözünürlük Grafikleri a) Tek Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık Tek Dedektör, b) İki Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık İki Dedektör, c) Dört Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık Dört Dedektör (Dairesel Açıklık : 0.25λ , Dairesel Açıklıklar Arası Mesafe : 0.25λ , Işık Kaynağı ve Dairesel Açıklıklar Arası Mesafe : 0.25λ , Dairesel Açıklıklar ile Dedektör Arası Mesafe : 100λ)



Şekil 5.2: Elde Edilen Çözünürlük Grafikleri a) Tek Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık Tek Dedektör, b) İki Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık İki Dedektör, c) Dört Kaynak Simetrik İki Dairesel Açıklık Dört Dedektör (Dairesel Açıklık : 0.25λ , Dairesel Açıklıklar Arası Mesafe : 0.125λ , Işık Kaynağı ve Dairesel Açıklıklar Arası Mesafe : 0.25λ , Dairesel Açıklıklar ile Dedektör Arası Mesafe : 100λ)

Sonuç olarak, korelasyon özelliğine sahip olmayan bağımsız tek foton kaynakları ve foton-foton yoğunluk korelasyon algılama yöntemi kullanılarak klasik optik çözünürlük limitlerinin ötesine geçilmiş, literatüre önemli bir katkı sunulmuştur. Süper-çözünürlük elde etmek için kuantum bileşenlerin karmaşıklığından bağımsız olarak önerilen bu çalışmada, yüksek çözünürlük sağlamak için daha pratik ve ulaşılabilir bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışmada, optik biliminde Rayleigh Kriteri ile sınırlı çözünürlük sorunu aşılarak, nano boyutlu nesnelerin görüntülenmesi ve incelenmesi için yeni bir yöntem ortaya koyulmuştur.

Hem önerilen yöntemin pratik ve uygulanabilir olması hem de kuantum özelliklere duyulan ihtiyacı ortadan kaldırması, tezin özgün yönünü ifade etmektedir. Literatürde süper-çözünürlük için genellikle yakın alan optiği, kuantum girişim ya da dolanık fotonlar gibi karmaşık sistemler kullanılırken, bu tez ile daha basit ve aynı zamanda etkili bir çözüm sunulmuştur. Kirchhoff kırınım integrali ve foton-foton yoğunluk korelasyon algılama yöntemi gibi matematiksel modeller kullanılarak, sistemin performansı başarılı bir şekilde analiz edilmiştir. Yapılan analizler sayısal hesaplama metodları ile doğru sonuçlara ulaşıldığını göstermiştir.

Bu çalışma, süper-çözünürlük alanında daha geniş bir uygulama potansiyeli sunarak bilimsel araştırmalar için yeni kapılar açma potansiyeline sahiptir. Optik görüntüleme sistemlerinde daha ekonomik ve pratik bir yöntem sağlayan bu tez, hem teorik özgünlüğü hem de teknolojik faydası ile dikkat çekmektedir.

Kaynaklar

- Ackermann, J., & Goesele, M. (2013). A Survey of Photometric Stereo Techniques. *Computer Graphics and Vision*, 9, 149-254. doi:10.1561/06000000065
- Andreou, C., & Raftopoulos, A. (2010). Lessons from the History of the Concept of the Ray for Teaching Geometrical Optics. *Springer*. doi:10.1007/s11191-010-9302-7
- Balakin, D., & Belinsky, A. (2015). Quantum Images with Super-Resolution. *Journal of Russian Laser Research*, 36. doi:10.1007/s10946-015-9539-3
- Boxem, R. V., Partoens, B., & Verbeeck, J. (2013, March). Dirac Kirchhoff Diffraction Theory. doi:10.48550/arXiv.1303.0954
- Browne, D., Bose, S., Mintert, F., & Kim, M. (20217, June). From Quantum Optics to Quantum Technologies. *Progress in Quantum Electronics*, 54, 2-18. doi:10.1016/j.pquantelec.2017.06.002
- Ersoy, O. K. (2007). *Diffraction, Fourier Optics and Imaging*. John Wiley & Sons.
- Ferri, F., Magatti, D., Gatti, A., Bache, M., Brambilla, E., & Lugiato, L. (2005). High-Resolution Ghost Image and Ghost Diffraction Experiments with Thermal Light. *Physical Review Letters*. doi:10.1103/PhysRevLett.94.183602
- Guarnieri, M. (2015). The Rise of Light. doi:10.1109/HISTELCON.2015.7307311
- Guarnieri, M. (2018). An Historical Survey on Light Technologies. *IEEE Access*. doi:10.1109/ACCESS.2018.2834432
- Handtmann, C. (2011, Aralık). *How Ballistic Identification Works*. Ballistic Identification: <https://ballisticsidentification.blogspot.com/2011/12/how-ballistic-identification-works.html>

- Kolkıran, A. (2024). Subwavelength Resolution Using The Near Field Of Quantum Emitters. doi:<http://doi.org/10.1364/OL.514768>
- Kolkıran, A., & Agarwal, G. (2018). Resolution of Objects Within Subwavelength Range by Using The Near Field of a Dipole. doi:10.48550/arXiv.1203.6506
- Kolobov, M. (2007). *Quantum Imaging*. Springer.
- Kolobov, M. I. (2008). Quantum Limits of Optical Super-Resolution. <https://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr/sfo-00270561v1>
- Lemos, G., Borish, V., Cole, G., Ramelow, S., Lapkiewicz, R., & Zeilinger, A. (2014). Quantum Imaging with Undetected Photons. *Nature*, 512, 409-412. doi:10.1038/nature13586
- Lytle, F. E. (1999). An Introduction to Diffraction. Part I: The Near Field.
- Oshikane, Y., Kataoka, T., Okuda, M., Hara, S., Inoue, H., & Nakano, M. (2007, April). Observation of Nanostructure by Scanning Near-Field Optical Microscope with Small Sphere Probe. *Science and Technology of Advanced Materials*, 8, 181-185. doi:10.1016/j.stam.2007.02.013
- Özbektaş, S., & Sungur, B. (2022, Mart). Ateşli Silahlarda Mermi Çapının Akış Alanına Etkisinin Nümerik İncelenmesi. *OMÜ Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi*, 1-14.
- Smith, A. (2004, June). What Is the History of Medieval Optics Really About? *Proceedings of the American Philosophical Society*, 148, 180-194. <http://www.jstor.org/stable/1558283>
- Vohnsen, B. (2004). A Short History of Optics. *Physica Scripta. Vol. T109*, 75-79. doi:10.1238/Physica.Topical.109a00075
- Zheng, X., Soons, J., Vorbürger, T. V., Song, J., Renegar, T., & Thompson, R. (2014). Applications of Surface Metrology in Firearm Identification. *Surface Topography: Metrology and Properties*. doi:10.1088/2051-672X/2/1/014012

Zubairy, M. S. (2016). *Optics in Our Time*. Springer Open. doi:10.1007/978-3-319-31903-2



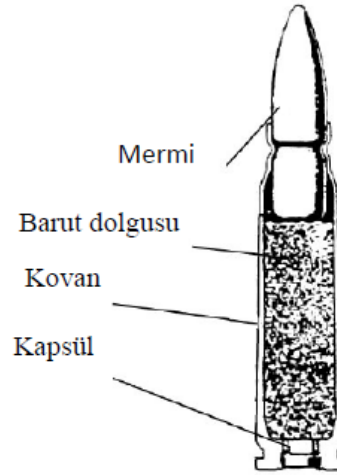


Ekler

Ek A

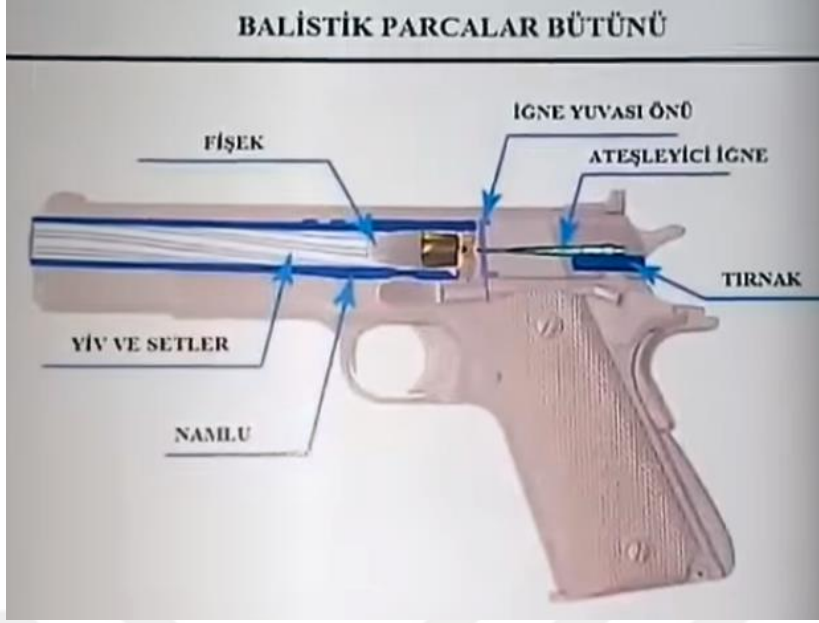
Balistika - Balistik İnceleme Sistemi

Ateşli silahların yaygınlaşması ile birlikte suç oranları da artmıştır. Suçlu, silah ve çekirdek arasında doğrudan bir ilişki vardır. Şuçluyu tespit etmek için ateşli silahlardan çıkan kovan ve çekirdeğin (merminin) incelenmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır.



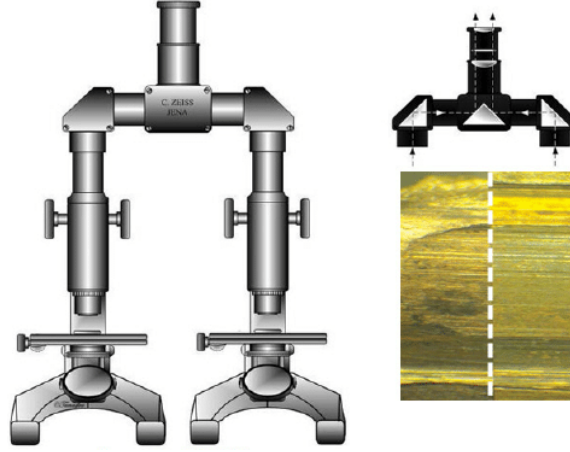
Ek Şekil 2: Hafif silah fişğine ait parçalar (Özbektaş & Sungur, 2022)

Ateşli silahlar kovan ve çekirdekte karakteristik izler bırakmaktadır. Kovan üzerinde bulunan karakteristik izler iğne izi ve çıkarıcı izidir. Çekirdek üzerinde bulunan karakteristik izler ise yiv ve set izleridir.



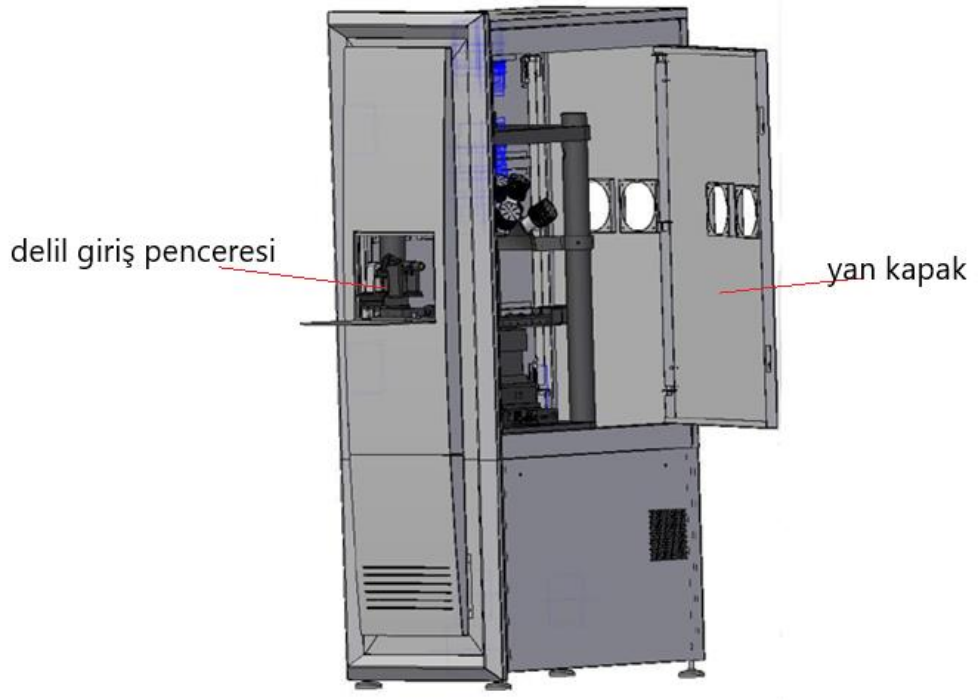
Ek Şekil 2: Ateşli Silah Mekanizması (Handtmann, 2011)

Teknolojinin yeterli olmadığı zamanlarda, kovan ve çekirdek analizi için delil mukayese mikroskopları kullanılmaktaydı. Bu özel mikroskoplarda karşılaştırılacak iki kovan veya iki çekirdek mikroskobun iki merceği altına koyulur ve aynı izler yakalanmaya çalışılır. Bütün delillerin tek tek incelenmesi, delil mukayesisinin uzun zaman alması, dijital kayıt olmaması, bölgesel çalışması gibi dezavantajları olması ve teknolojinin ilerlemesi ile birlikte kovan ve çekirdek analizi yapan cihazlar geliştirilmiştir.



Ek Şekil 3: Delil Mukayese Mikroskobu (Zheng vd, 2014)

Balistika, ateşli silahların kovan ve çekirdekte bıraktığı karakteristik izleri tespit edebilmek için kovan ve çekirdeğe ait 3B görüntü oluşturmaktadır. Görüntü oluşturmak için birden fazla LED aydınlatma ve tek dedektör kullanılmaktadır.



Ek Şekil 4: Balistika kabin görseli

Her defasında tek LED aydınlatma yaparak görüntü alınmakta ve alınan görüntüler birleştirilerek 3D görüntü oluşturulmaktadır. 3D görüntü oluşturmak için Stereoscopic 3D Yüzey Oluşturma yöntemi kullanılmaktadır. Stereoscopic 3D Yüzey Oluşturma yöntemi, birden fazla perspektiften alınan görüntülerin üst üste çakıştırılması ile derinlik bilgisi elde etmeyi sağlamaktadır. Bu yöntem kabaca insan gözlerinin 3D algısını taklit etmektedir. Bu tür LED aydınlatma, tek dedektör ve klasik teknikler ile yüksek çözünürlük elde edilememektedir.

