**ANKARA ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

# KIZILÖTESİ ESASLI AKTİF ALGILAMA KULLANILARAK IŞIK OLMAYAN ORTAMLARDA ICCD İLE GÖRÜNTÜ ALINMASI VE ICCD ANALİTİK MTF'İN ÇIKARILMASI

**Nebi GÜL**

**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ANKARA**
**2010**

**Her hakkı saklıdır**

## ÖZET

Doktora Tezi

KIZIL ÖTESİ ESASLI AKTİF ALGILAMA KULLANILARAK IŞIK OLMAYAN ORTAMLARDA ICCD İLE GÖRÜNTÜ ALINMASI VE ANALİTİK ICCD MTF'İN ÇIKARILMASI

Nebi GÜL
Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat EFE

Bu çalışmada; bir adet görüntü yoğunlaştırıcı tüplü CCD kamera (ICCD) ve bir adet kızılötesi (IR) kaynaktan oluşan bir aktif görüntüleme sistemi ile Modülasyon Transfer Fonksiyon (MTF)'e dayalı modellemesi gerçekleştirilmiştir. ICCD için, monoküler Gece Görüş Cihazı (GGC), uygun bir adaptör ve CCD kamera kullanılmıştır. ICCD kamera ve IR kaynak ile aktif ICCD kamera cihazı yapılmış ve hiç ışık olmayan koşullarda, termal görüntüleme yöntemi haricinde görüntü alınmıştır. Yapılan ICCD'nin SNR'sı hesaplanmış ve ICCD'nin MTF'inde en baskın eleman olan GGC için bir regülasyon katsayısı geliştirilerek hata payı % 20'den % 3 seviyesine düşürülen analitik MTF uygulanarak, askeri standarlarda GGC için verilen MTF ölçüm sonuçlarını yakın MTF formülasyonun geçerliliği tanıtlanmıştır.

ICCD'nin testi için 6 m ve 40 m lik karanlık test ortamları kullanılarak aktif yöntem ile ICCD ile IR ledli güvenlik kamerasının görüntüleri mukayese edilmiştir. Böylece aynı koşullar altında, ışık olmayan ortamda CCD, GGC, ICCD ve IR ledli CCD'nin birbiriyle mukayesesi yapılmıştır.

GGC'nin MTF ölçüm sonuçları ile MTF formülünün uyumunu sağlamak için geliştirilen regülasyon katsayısının ICCD analitik MTF sonuçlarını da düzelttiği ve sonucun 25 çizgi çifti/mm ne kadar kabul edilebilir bir doğruluk seviyesinde olduğu gösterilmiştir.



**Nisan 2010, 116 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** ICCD, MTF, IR kaynak, CCD, Aktif Görüntüleme

**ABSTRACT**

Ph. D. Thesis

IMAGE ACQUSITION WITH ICCD CAMERA AT ULTRA LOW LIGHT LEVEL THROUGH IR-BASES ACTIVE SENSING AND ANALYTIC CALCULATIONS OF ICCD MTF

Nebi GÜL

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronic Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Murat EFE

In this study, MTF modelling of an active imaging system composed of an Image Intensifier Tube added CCD (ICCD) and an IR-bases source are studied. For ICCD, a monocular Night Vision Sight (NVS) device, a CCD and a suitable adapter are used. An active imaging system is built using an ICCD camera and an IR source, and images are taken under ultra low light level conditions, except thermal imaging. In this study, a regulation factor for the MTF of NVS device has been developed. The proposed regulation formula yields values, given in military standards, within 3 % of the experimental results while the old formula produces approximately 20 % difference. Thus the regulation formula is verified.

For ICCD's test, 6 m and 40 m dark test laboratories are used. CCD and NVS device are also tested under the same conditions to compare the resolution power of the ICCD. It's observed that under ultra low light level condition CCD and NVS could not achieve satisfactory image, but active ICCD could.

In order to arrange MTF formula and NVS's MTF measurement results, a regulation coefficient has been developed for formula and it's confirmed that results of ICCD analytic MTF are within acceptable level of accuracy for the spatial frequency under 25 line pair/mm.

**Aapril 2010, 116 pages**
**Key Words:** ICCD, MTF, IR-Bases Source, CCD, Active Imaging

## TEŞEKKÜR

Doktora konusu seçiminde ve hazırlanmasında yardımcı olan danışmanım ve değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat EFE'ye (A.Ü. Müh. Fak. Elektr. Müh. Anabilim Dalı) doktora süresince yapmış olduğu değerli katkı ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Tez izleme komitesi üyesi hocalarım Sayın Prof. Dr. Cengiz BEŞİKCİ'ye (ODTÜ Müh. Fak. Elkt-Elektr. Müh.) ve Sayın Doç.Dr. Ziya TELATAR'a (A.Ü. Müh. Fak. Elektr. Müh. Anabilim Dalı) tezin oluşmasına yaptıkları katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez jürisi üyesi hocalarım Sayın Doç.Dr. Uğur BAYSAL'a (H.Ü. Müh. Fak. Elkt-Elektr. Müh.) ve Sayın Yrd.Doç.Dr Fikret ARI'ya (A.Ü. Müh. Fak. Elektr. Müh. Anabilim Dalı) konuya açıklamalar getiren değerli yorum ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bölüm arkadaşım Gökhan SOYSAL ile çalışmalarım esnasında beni sabır ve özveri ile destekleyen eşim Betül GÜL ile çocuklarım Yarkın ve Yaren' e çok teşekkür ederim.

Doktoraya başlarken cesaret vererek teşvik eden Bölümümüzün kurucusu Sayın Prof. Dr. Önder TÜZÜNALP'i de bu vesile ile bir kez daha rahmetle ve şükranla anıyorum.

Yıllar önce okyanusta batan bir gemiden okyanusun sularına atlayan insanların canyelekleri oldukları halde kurtulma şansları yok denecek kadar az iken, artık termal kameralar ve aktif gece görüş sistemleri ile çeşitli felaket senaryolarına hazır halde bekleyen, kazazedeleri km'lerce uzaktan tespit edebilecek ekipler teçhiz ve tahsis edilmiştir. Özellikle gelişmiş ülkelerde "Titanik" benzeri büyük bir felaketin bir daha yaşanmayacağı öngörülmektedir. Küçük ve ucuz olması sebebiyle deprem dahil her türlü arama-kurtarma ve güvenlik kamerası uygulaması için vazgeçilmez bir unsur olan CCD'yi keşfeden (1970) Willard Boyle ve George Smith'e yaklaşık 40 yıldır günlük hayata giren bu ürün için ne kadar teşekkür etsek azdır. Kendileri CCD çalışmaları ile ilgili olarak 2006 Ocak ayında, "National Academy of Engineering" ödülü ile onurlandırılmışlardır. Güvenlik, sağlık ve uzay alanlarındaki bir çok gelişmenin başlangıcı olan bu keşif için bu vesile ile insanlık adına bir kez daha CCD'yi keşfedenlere teşekkür etmek istiyorum.

Nebi GÜL
ANKARA, Nisan 2010

## İÇİNDEKİLER

**ÖZET..... i**

**ABSTRACT..... ii**

**TEŞEKKÜR..... iii**

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... vi**

**ŞEKİLLER DİZİNİ..... vii**

**ÇİZELGELER DİZİNİ..... xi**

**1. GİRİŞ ..... 1**

**1.1 Görüntüleme Sistemleri ve Optik Spektrum..... 3**

**1.2 Görüntü Yoğunlaştırıcı Cihazların Genel Yapısı ..... 5**

**1.3 CCD (*Charge Coupled Device*)..... 9**

**1.4 ICCD/ ICMOS Cihazı ..... 13**

**2. KURAMSAL TEMELLER..... 14**

**2.1 Pasif-Aktif Algılama..... 15**

**2.2 Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF)..... 18**

**2.3 Ayırma Gücü Ölçümü..... 25**

**2.4 MTF ve Ayırma Gücü Analizi İle İlgili İlave Bilgiler..... 27**

**2.5 Gerçek Bir Sistemin MTF Çıktısı..... 28**

**2.6 MTF'in Analizinde Dikkat Edilecek Hususlar..... 29**

**2.7 Görüntü Yoğunlaştırıcı Cihazların MTF Yapısı..... 30**

**3. MATERYAL VE YÖNTEM..... 33**

**3.1 Giriş..... 33**

**3.2 Ölçüm Ortamları..... 34**

**3.3 Hedefler..... 34**

**3.4 Araştırmada Kullanılan ve Yapılan Cihazlar..... 35**

**3.5 Aktif Görüntüleme Sisteminin Parçaları..... 37**

**3.6 ICCD'nin MTF Analizi..... 40**

**3.7 IR Kaynak Analizi..... 63**

**4. ARAŞTIRMA BULGULARI..... 64**

**4.1 Yapılan Ölçümler..... 64**

**4.2 IR Kaynağı Seçiminde Dalgaboyu Analizi ve Aktif Görüntüleme Yöntemi. 69**

**4.3 Alınan Görüntüler..... 70**

**4.4 ICCD'nin SNR Heasplamaları..... 74**

**4.5 IR Kaynaklı ICCD ile IR ledli CCD'nin Mukayese Çalışması..... 77**

**5. TARTIŞMA VE SONUÇ..... 84**

**KAYNAKLAR ..... 87**

**EKLER..... 91**

**EK 1 Kanada ALBEDOS Projesi Özellikleri ve Proje Katılım Mektubu ..... 92**

**EK 2 5. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalışma Toplantısı ..... 95**

**EK 3 ICCD Görüntü Yoğunlaştırma Tüpü Güç Besleme Kontrol Devresi..... 97**

**EK 4 Kızılötesi IR Kaynak Devresi..... 98**

**EK 5 OD 669 Kızılötesi IR Diyot..... 101**

**EK 6 TJEECS 'de Yayımlanan Makale ..... 102**

**EK 7 Çalışmalarda Kullanılan Cihaz ve Özellikleri ..... 113**

**EK 8 Aktif Görüntü Algılama ve Uygulama Örneği..... 114**

**ÖZGEÇMİŞ..... 116**

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| A.Ü. | Ankara Üniversitesi |
| CCD | Charge Coupled Device |
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor |
| CW | Sürekli Dalga (Continuous Wave) |
| F.T. | Fourier Dönüşümü (*Fourier Transform*) |
| H.Ü. | Hacettepe Üniversitesi |
| Gen 0 | Sıfırıncı Nesil |
| Gen I | Birinci Nesil |
| Gen II | İkinci Nesil |
| Gen III | Üçüncü Nesil |
| GGC | Gece Görüş Cihazı |
| GYT | Görüntü Yogunlaştırıcı Tüp |
| G.Ü. | Gazi Üniversitesi |
| ICCD | Image Intensifier CCD |
| ICMOS | Image Intensifier CMOS |
| IIT | Image Intensifier Tube |
| IR | Kızıl Ötesi (Infra Red) |
| MCP | Mikro Kanallı Plaka (Micro channel Plate) |
| MOS/MIS | Metal Oxide Semiconductor/Metal Insulator Semiconductor |
| MÖMS | Minimum Ölçülebilir Modülasyon Seviyesi |
| NEM | Gürültü Eşdeğeri Modülasyon (Noise Equivalent Modulation) |
| PIC | Programlanabilir Entegre Devre (Programable Integrated Circuits) |
| PRF | Darbe Tekrar Frekansı (Pulse Repetation Frequency) |
| SNR | Sinyal Gürültü Oranı (Signal Noise Ratio) |
| USAF | ABD Hv.K.K.K.lığı (US Air Force) |
| Θ | Açısal Periyot |

# ŞEKİLLER DİZİNİ


Şekil 1.1 Optik spektrum ve genel spektrum ilişkisi..... 4

Şekil 1.2 Kızılötesi bölgenin atmosfer geçirgenlik ile bağlantısı..... 4

Şekil 1.3 Spektral hassasiyet insan gözü ve CCD/CMOS karşılaştırması..... 5

Şekil 1.4 Görüntü yoğunlaştırıcı cihazların temel yapısı..... 5

Şekil 1.5 Gece görüş cihazında görüntü aktarımı ..... 6

Şekil 1.6 Fotokatod işlevi..... 7

Şekil 1.7 II. ve III. nesil tüplerde fotokatod hassasiyetinin dalga boyuna bağlı değişimi..... 9

Şekil 1.8 Ürün olarak kullanıma hazır bir CCD örneği..... 9

Şekil 1.9 CCD yüzeyi ve ışık hücreleri örneği..... 10

Şekil 1.10 CCD yapısı içinde oluşan görüntünün çıkışa taşınması..... 10

Şekil 1.11 CCD ve diğer sensör piksel sayılarının tarihsel gelişimi..... 12

Şekil 1.12 ICCD temel gösterimi..... 13

Şekil 1.13 Çalışmalarda yapılan 2 adet ICCD..... 13

Şekil 2.1 Pasif algılayıcıların ayırma gücü mukayesesi..... 15

Şekil 2.2 IR kaynaklı aktif görüntülemenin temel çalışma prensibi..... 16

Şekil 2.3 IR kaynağı ile aktif görüntüleme çalışmasına bir örnek ..... 17

Şekil 2.4 Sistemin MTF değeri azaldıkça ayırt edilen kontrastın azalması ..... 19

Şekil 2.5 Sinüs dalga test nesnesi ve kırınım sınırlı genlik görüntüsü..... 20

Şekil 2.6 Modülasyon kriterleri..... 21

Şekil 2.7 1.D (1 boyutlu) ışık Profili..... 23

Şekil 2.8 Açısal uzaysal frekans..... 23

Şekil 2.9 15 çizgi çifti/mm uzaysal frekansta modülasyon değerinin bulunması..... 24

Şekil 2.10 Giriş ( görüntülenen nesne)..... 24

Şekil 2.11 Çıkış..... 25

Şekil 2.12 MTF'in uzaysal frekans ile değişimi..... 25

Şekil 2.13 Gürültü Eşdeğeri Modülasyon Seviyesi (çözünürlük sınırı)..... 26

Şekil 2.14 A ve B iki farklı MTF..... 26

Şekil 2.15 Ayırma gücü ve kontrast sınır değişimi..... 27

Şekil 2.16 USAF 1951 ABD Askeri standart hedefi..... 27

Şekil 2.17 Örnek bir gerçek sistemin MTF çıktısı ..... 29

Şekil 2.18 Görüntü yoğunlaştırıcı tüpün çalışma prensibi..... 31

Şekil 2.19 Mikrokanallı plaka işlevi..... 31

Şekil 3.1 IR ışın kaynaklı aktif görüntüleme elemanları..... 35

Şekil 3.2 Çalışmada kullanılan cihazlar..... 35

Şekil 3.3 ICCD çalışmalarında kullanılan kayıt cihazı..... 36

Şekil 3.4 IR esaslı aktif görüntüleme elemanları..... 37

Şekil 3.5 IR ışın esaslı aktif görüntüleme sisteminin üstten görünüşü..... 38

Şekil 3.6 ICCD'yi oluşturan CCD ve gece görüş cihazı..... 38

Şekil 3.7 Aktif görüntüleme sisteminin IR kaynağını oluşturan elemanlar..... 39

Şekil 3.8 IR ışın kaynağı çalışma frekans bilgileri..... 40

Şekil 3.9 Uzaysal frekans ve uzaklık bağlantısı ..... 42

Şekil 3.10 MTF optik..... 44

Şekil 3.11 Görüntü yoğunlaştırıcı tüp örneği..... 45

Şekil 3.12 MTF gece görüş değerleri..... 46

Şekil 3.13 Regülasyonlu MTF gece görüş değerleri..... 48

Şekil 3.14 Regülasyonlu MTF ve MX-10160 gerçek değerleri..... 49

Şekil 3.15 Regülasyonlu ve regülasyonsuz MTF $_{g.yoğ}$ için genlik Ters FT'ler..... 50

Şekil 3.16 Regülasyonlu ve regülasyonsuz MTF $_{g.yoğ}$ için faz Ters FT'ler..... 51

Şekil 3.17 Nesiller arasındaki MTF farkının gösterimi..... 52

Şekil 3.18 1. nesil GGC için ölçülen MTF değeri ile regüleli MTF..... 53

Şekil 3.19 2. nesil GGC için ölçülen MTF değeri ile regüleli MTF..... 54

Şekil 3.20 4. nesil GGC için ölçülen MTF değeri ile regüleli MTF ..... 55

Şekil 3.21 CCD formatında ..... 58

Şekil 3.22 MTF ekran değerlerinin çizimi..... 60

Şekil 3.23 ICCD'nin analitik MTF değerinin çizimi..... 61

Şekil 3.24 Örnek veri ile hesaplanan MTF ICCD'nin mukayesesi ..... 62

Şekil 4.1 İnsan gözü spektrali ve IR kaynak seçiminde dalgaboyu sınırı ..... 69

Şekil 4.2 a. Normal ışık altında flaşlı fotoğraf b. ICCD ile çekilen fotoğraf..... 70

Şekil 4.3 IR ışın kaynaklı geniş açılı fotoğraf b. ICCD ile çekilen fotoğraf..... 70

Şekil 4.4. a. CCD kamera normal hedef b. Aktif görüntüleme ile alınan görüntü.... 71

Şekil 4.5 IR ışın kaynağı ile süre optimizasyon sağlanarak çekilmiş bir görüntü..... 72

Şekil 4.6 IR ışın kaynağının saat hedefinden dik konumlu olarak yansıması..... 72

Şekil 4.7.a. IR ışın kaynağı yok görüntü yok, b.Kaynak var hedef algılanıyor..... 73

Şekil 4.8.a. IR ışın kaynağı açık ağaçtan alınan görüntü, b.Park halinde araç..... 74

Şekil 4.9 Ölçümlerin yapıldığı koridor. Koridor boyu yaklaşık 40 m dir..... 78

Şekil 4.10 Hedef olarak kullanılan damalı tahta ve metal malzeme..... 78

Şekil 4.11 Ortamda ışık yokken alınan görüntü..... 79

Şekil 4.12.a. IR ledli standart güvenlik kamerası b. ICCD kamera IR kaynak..... 79

Şekil 4.13.a. 4 m için ledli standart kamera b. 4 m için ICCD kamera IR kaynaklı... 80

Şekil 4.14.a. 10 m için ledli standart kamera b.10 m için ICCD kamera IR kaynaklı. 80

Şekil 4.15.a. 20 m için ledli standart kamera b.20 m için ICCD kamera IR kaynaklı. 81

Şekil 4.16.a. 30 m için ledli standart kamera b.30 m için ICCD kamera IR kaynaklı. 82

Şekil 4.17. a.40 m için ledli standart kamera b.40 m için ICCD kamera IR kaynaklı. 82

# ÇİZELGELER DİZİNİ


Çizelge 1.1 Gen II ve Gen III 810 nm'de Quantum verimliliği ve hassasiyeti..... 8

Çizelge 1.2 CCD'nin Tarihçesi..... 11

Çizelge 2.1 USAF 1951 Ayırma Gücü Tablosu..... 28

Çizelge 2.2 MX-10160 18 mm GEN III GYT MTF Değerleri..... 32

Çizelge 3.1 IR ışın kaynağının özellikleri..... 35

Çizelge 3.2 Optik MTF değerleri..... 43

Çizelge 3.3 MX-10160 için MTF Analizi Regülasyonsuz..... 45

Çizelge 3.4 MX-10160 için MTF Analizi Regülasyonlu..... 47

Çizelge 3.5 GYT için MTF değerleri ve farkı..... 48

Çizelge 3.6 1-4 Nesil GYT için ölçülen MTF'ler..... 51

Çizelge 3.7 Yatay Uzaysal frekansa bağlı $MTF_{CCD}$ değişimi..... 57

Çizelge 3.8 $MTF_{Ekran}$ değerleri..... 59

Çizelge 3.9 Örnek Veri ile hesaplanan $MTF_{ICCD}$ farkı..... 62

Çizelge 4.1 Aydınlatma seviyeleri ve denk gelen doğal ışık şiddeti..... 64

Çizelge 4.2 Grup/Eleman cinsinden 1. Eleman için test sonuçları..... 64

Çizelge 4.3 Grup/Eleman cinsinden 2. Eleman için test sonuçları..... 65

Çizelge 4.4 Grup/Eleman cinsinden 3. Eleman için test sonuçları..... 66

Çizelge 4.5 Grup/Eleman cinsinden 4. Eleman için test sonuçları..... 66

Çizelge 4.6 Grup/Eleman cinsinden 5. Eleman için test sonuçları..... 66

Çizelge 4.7 Çizgiçifti/mm uzaysal frekans cinsinden 1. eleman test sonuçları..... 67

Çizelge 4.8 Çizgiçifti/mm uzaysal frekans cinsinden 2. eleman test sonuçları..... 67

Çizelge 4.9 Çizgiçifti/mm uzaysal frekans cinsinden 3. eleman test sonuçları..... 67

Çizelge 4.10 Çizgiçifti/mm uzaysal frekans cinsinden 4. eleman test sonuçları..... 67

Çizelge 4.11 Çizgiçifti/mm uzaysal frekans cinsinden 5. eleman test sonuçları..... 68

Çizelge 4.12 Çizgiçifti/mm cinsinden genel test sonuçları..... 68

# 1. GİRİŞ

Yüzyıllardır güvenlik alanında yapılan bilimsel çalışmalar sonucunda geliştirilen gözetleme teknikleri; günümüzde elektro-optik sistemlerin de devreye girmesi ile daha da gelişerek başlıbaşına bir teknolojik sektör olmuştur. Özellikle internet altyapısı ile birleşerek dünyayı ve herkesi anlık izlenir hale getiren güvenlik sistemlerinin bu güçlü yanlarına karşın, bu cihazlarla hiç ışık olmayan sınır, sahil vb. ortamlarda gece koşullarında yeterli seviyede bir görüntü alınamamaktadır. Bu dezavantajı yenmek için günümüzde en yaygın kullanılabilir cihazlar termal görüş cihazlarıdır[1]. Bu cihazların en kritik parçalarından biri olan sensör ünitesinin algılama yapması için soğutma birimine ihtiyacı olması ve bu soğutma biriminin mekanik parçalardan oluşması sebebiyle belirli bir süre kullanıldıktan sonra soğutucunun değiştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Uygulamada 1000 saatlik sürekli çalışmada devamlı soğutma yapabilecek soğutucu kalite testini geçebilecek mekanik bir soğutucu onbinlerce dolar seviyesindedir. Bu sebeple termal sistemleri işlevsel olarak yedekleyecek uygun maliyetli sistemler de ihtiyaç haline gelmektedir. Buna bağlı olarak, ışık olmayan ortamlarda görüntü alınabilmesini mümkün kılan harici aydınlatma kaynakları kullanılarak yani aktif algılama yöntemi ile görüntü alan CCD/CMOS kameralı daha ucuz görüntüleme cihazları öne çıkmaktadır (Biberman 2000).

Aktif algılama, sensör ve ışın kaynağı açısından yaygın olarak iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi son yıllarda özellikle güvenlik kamerası olarak kullanılan, CCD/CMOS sensörlerine entegre edilen IR ledleri ile yapılan yakın alan görüntü kayıt cihazları olurken; ikincisi, daha uzaktaki cisimlerin de görüntülenebilmesi için uygun optik sistemlerin ve güçlü aydınlatma laseri veya yüksek güçlü IR ledli ışın kaynaklarının da kullanıldığı; sensör olarak ise anahtarlama (*gating*) tekniğinin kullanılmasına uygun olan ICCD/ICMOS'un kullanıldığı; anahtarlamalı aktif görüntülemedir. Bu şekilde doğal karanlık bölgelerin hem güvenlik, hem de arama-kurtarma maksatlı izlenmesi, taranması ve monitörize edilerek kayıt altına alınması mümkün olabilmektedir.

[1]Termal cihazlar; 3-5 μm ve 8-12 μm bandında çalışan sensörlü cihazlardır (Beşikçi 2008).

Aktif algılama yönteminde kullanılan ışın kaynağı sebebiyle cihazın yerinin belli olması dezavantaj olmakla birlikte; tamamen geri yansıtma (retro-reflektör) özellikli cisimleri görüntülemedeki yüksek üstünlüğü termal sistemlere göre de bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca cihazın bu özelliği açık denizlerde retro-reflektör özellikli can yelekli bir insanın km'lerce uzaktan algılanabilmesi vb. sivil uygulamalar ve çatışma bölgelerinde görülen dürbünlü keskin nişancı mevzilerinin tespitini de mümkün kılmaktadır. Anahtarlamalı yöntemin bir başka kullanım alanı da ICCD ve sisteme entegre edilen bir senkronizasyon devresi ile sistemin gürültü optimizasyonun yapılarak etkili algılama menzilinin uzatılmasıdır (Gül 2007).

Görüntü Yoğunlaştıcı Tüplü CCD/CMOS (ICCD/ICMOS)'un anahtarlama özelliğinin görüntüleme alanında kullanılması ile ICCD yüksek hız ve yüksek performans gerektiren hızlı fotoğraflama ve görüntü kayıt uygulamalarında da en yaygın olarak kullanılan araç haline gelmiştir (http://www.andor-tech.com. 2010) ve canlı hücrelerdeki nanosaniyelik mikrobiyolojik geçiş süreçlerinden, kimyasal tepkimelerdeki atomik etkileşimlerin ve maddelerin kimyasallarının spektroposkopik analizinin tahribatsız olarak yapılmasına kadar geniş bir alanda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/ camera_System/Sensors_01. htm. 2009). Bu yöntemi kullanan cihazlar gelişmiş ülkelerde arama-kurtarma, ileri tıbbi çalışma, sanatsal araştırma, fiziko-kimya uygulama amaçlı gözükmekle birlikte; özellikle doğu kaynaklı yayınlarda bir çok askeri amaçlı uygulamaların da yapıldığı tespit edilmiştir (Li 2005). Bütün bu yaygın uygulama alanına rağmen, Gece Görüş Cihazı (GGC) ve CCD cihazlarının çeşitliliği ve bu iki sistemin birçok değişik yöntemle birleştirilerek her seferinde değişik özellikli yeni bir ICCD oluşturmaları sebebiyle; üreticiler tarafından özellikleri bütün yönüyle kullanıcıya verilmeyen cihazlar olarak ortaya çıkmaktadır. ICCD üretiminde ise üreticiler uzmanlık alanlarına bağlı olarak genellikle özgün ICCD'yi; talepler doğrultusunda sistemlere özgü olarak üretmeyi tercih etmektedirler. ICCD'nin iç yapısının bütün parametrelerinin tam olarak bilinmemesi ise, sistem ile ilgili analitik modellemede ICCD'nin modellenmesi ile ilgili olarak; özellikle foton-elektron dönüşümünün gerçekleştiği GYT'lü GGC'den kaynaklanan benzetim problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada parametrelerin mümkün olduğunca kontrol edilebilmesi için Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF) askeri

standartlarda verilen GGC ile parametreleri bilenen bir CCD kamera kullanılarak yeni bir ICCD yapılmış, bu ICCD'nin tüm sistem MTF'i, yaygın olarak bilinen bir formül için geliştirilen bir regülasyon katsayısı sayesinde deneysel olarak elde edilen verilere daha yakın sonuçlar üreten yeni bir analitik formül olarak elde edilmiştir.

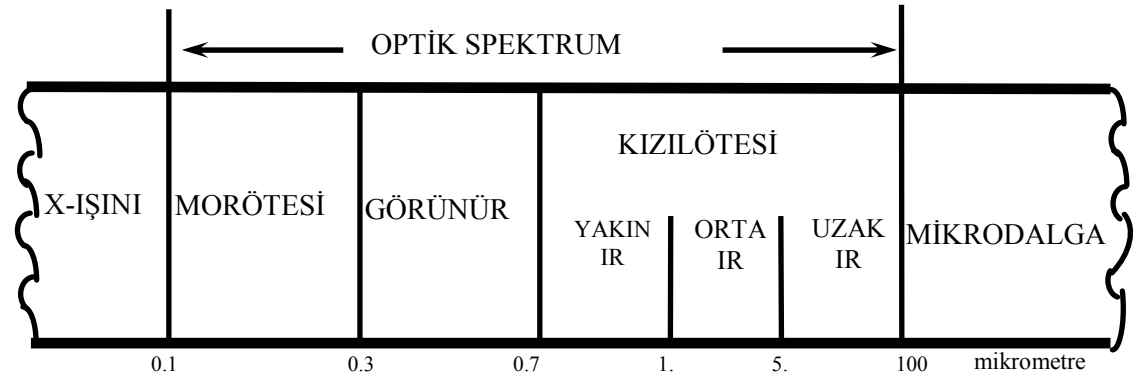
Uygulama alanında ise aynı ölçüm koşulları altında IR aydınlatmalı CCD kamera ile harici IR ışın kaynaklı ICCD'nin hiç ışık olmayan ortamda alınan görüntüleri mukayese edilmiş, böylece GGC ve CCD açısından bir uyumsuzluk olmadığı ve ICCD'nin manuel olarak anahtarlanması ile görüntü alınabildiği gösterilmiştir. Bu ise; çalışmalarda kullanılan ICCD'nin modellemesinde ve oluşturulmasında GGC'nin fotokatoduna uygun olarak seçilen kızılötesi esaslı ışın kaynağının verimli olduğunu ve bu sayede ışık olmayan ortamlarda ICCD ile görüntü alınabildiğini göstermiştir. Böylece; regüleli MTF ile daha gerçekçi bir modeli oluşturulan ICCD için literatürdeki ölçülmüş MTF'lere analitik olarak kabul edilebilir ölçülerde yaklaşıldığı da gösterilmiştir.

Diğer taraftan, yüksek lisans döneminde yapılan; insan gözü, CCD, GGC ve ICCD'nin pasif olarak algılama düzeyleri ile ilgili mukayeseli deneysel sonuçlar tez çalışmasına özet olarak alınarak, hem ICCD'nin alt birimleri açıklanmış, hem de gece görüş sistemlerinin incelenmesi ve araştırılmasında bir bütünlük sağlanmıştır.

## 1.1 Görüntüleme Sistemleri ve Optik Spektrum

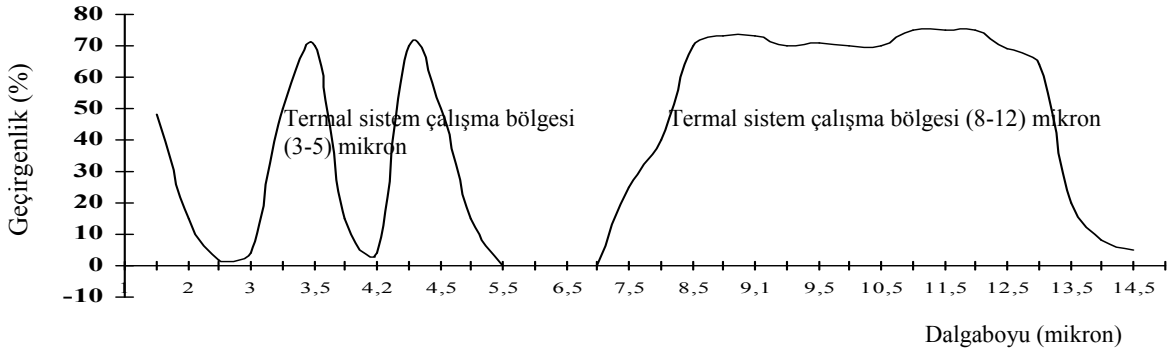
Gece görüş cihazları[2]; spektrumun görünür bölge ve üzerindeki foton ve elektromanyetik enerjileri algılamak üzere tasarlanmış cihazlardır (Biberman 2000). Optik Spektrum ve genel spektrum ilişkisi Şekil 1.1'de verilmiştir.

[2]Termal görüntüleme cihazları dışında kalan ve görünür bölgenin hemen üzerinde, yakın kızılötesi (IR) bölgeye kadar algılama yapabilen, düşük enerjili fotonların yükseltilerek algılanması prensibi ile çalışan görüntü yoğunlaştırıcı tüplü sistemlere pasif gece görüş cihazları denmektedir.



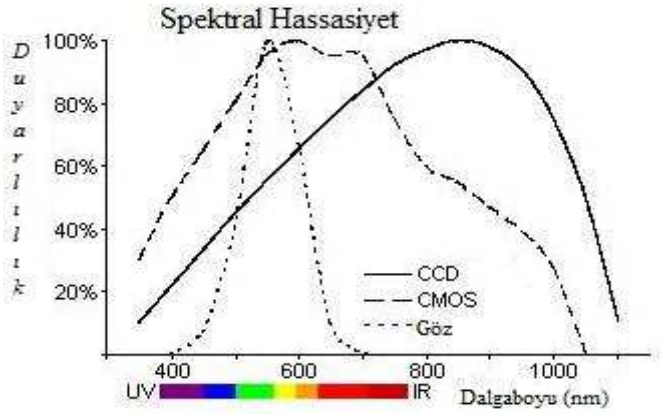

Şekil 1.1 Optik Spektrum ve Genel Spektrum İlişkisi (Holst 1998)

Genel spektrum içerisinde çok kısıtlı bir alan olan görünür spektrum ile ultraviyole (UV) ve kızılötesi spektrum ilişkisi şekil 1.2'de ve kızılötesi bölgenin atmosfer geçirgenliği, CCD ve CMOS ile bağıntısı da şekil 1.3'de görülmektedir.




Şekil 1.2 Kızıl ötesi bölgenin atmosfer geçirgenlik ile bağlantısı (Beşikçi 2008)

CMOS ve CCD kızılötesi bölgede insan gözüne göre daha fazla enerji algılayabilmektedir. Duyarlılık açısından insan gözü CCD ve CMOS sensörlere göre daha dar bir alanda algılama yaptığı şekil 1.3'den görülmektedir. Aktif uygulama için aydınlatma kaynağı olarak genelde tercih edilen 800 nm civarındaki laser ve yüksek enerjili IR ledli ışın kaynaklarına CCD'nin en yüksek hassasiyeti göstermesi, CCD'nin CMOS sensörlere karşı bir başka üstün yanını göstermektedir.

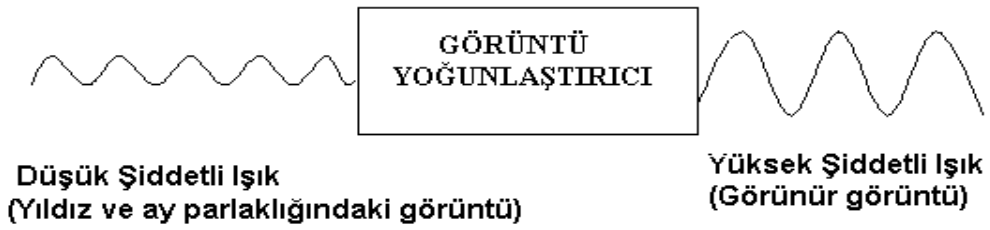



Şekil 1.3 Spektral Hassasiyet; İnsan Gözü ve CCD/CMOS Karşılaştırılması (http://www.fen-net.de/walter.preiss/e/wp_frame.html 2009).

Şekil 1.1'de görünür bölge yaklaşık 300-700 nm ile gösterilmekte iken, Şekil 1.3'de gösterilen insan gözü hassasiyetinin 400-700+ nm arasında olmasının farkı; insan gözünün gündüz tepkisi (*Photopic)* ve gece tepkisinin (*Scotopic*) farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Anonim 1993).

### 1.2 Görüntü Yoğunlaştırıcı Cihazların Genel Yapısı

Görüntü yoğunlaştırıcı cihazlar, düşük şiddetli optik görüntüyü algılayıp daha yüksek şiddetli görünür görüntüye çeviren elektro-optik aletlerdir. Şekil 1.4'te görüntü yoğunlaştırıcı cihazların temel yapı fonksiyonu gösterilmektedir.

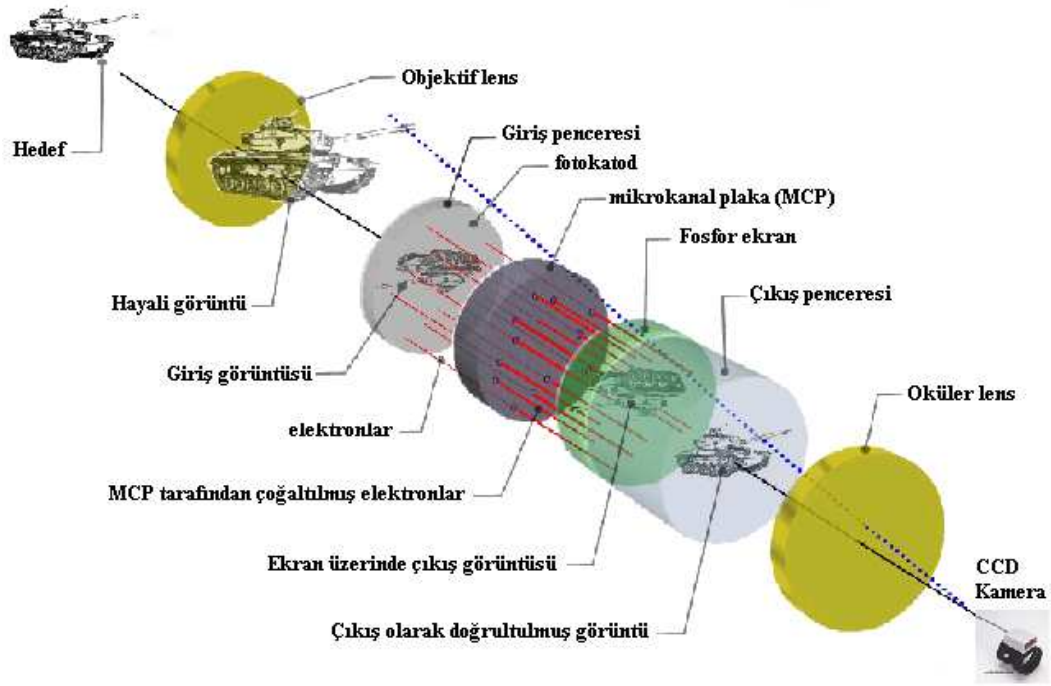



Şekil 1.4 Görüntü yoğunlaştırıcı cihazların temel yapısı

Bir hedeften çıkan düşük yoğunluktaki ışık demetinin fotonları ortamı geçtikten sonra gece görüş cihazının dış optik kısmından da geçerek görüntü yoğunlaştırıcı tüpe ulaşır. Orada kazancı binlerce defa arttırılarak görüntü yoğunlaştırıcı tüpten çıkar. Çeşitli optik

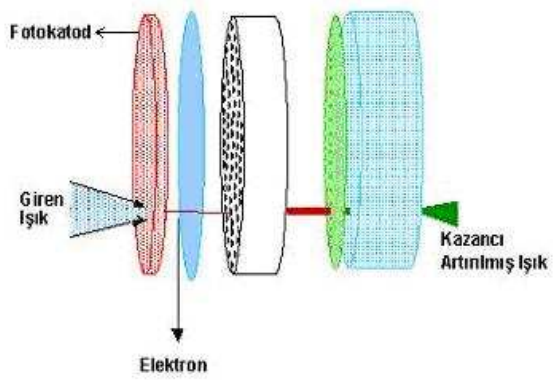
malzemelerle yönlendirilen görünür görüntü, şekil 1.5.'de görüldüğü gibi görüntü aktarımı çıkış optiğine gelerek gözümüze ulaşır.

Görüntü yoğunlaştırıcı tüp, şekil 1.5'de görülen yapısı içerisinde düşük şiddetli ışığı yüksek şiddetli ışığa dönüştürebilmesi için, fotokatod, iyon tutucu film, mikrokanallı plaka ve fosfor ekrandan oluşan bir sistem olarak çalışmaktadır (Biberman 2000).




Şekil 1.5 Gece Görüş Cihazında Görüntü Aktarımı (Gül 2003)

Optik görüntüye ait düşük şiddetteki fotonlar, objektif merceği ve tüp takımı giriş optiği üzerinden fotokatoda ulaşır. Fotokatod, bu fotonları elektronlara dönüştürür. Fotokatod III. nesil cihazlarda 900 nm dalga boyuna yakın kızıl ötesi bölgede de hassasiyet göstermektedir (Mukund 1993). Fotokatodun ışık (foton) demeti için giriş penceresi işlevini görmesi ve foton-elektron dönüşümü şekil 1.6'da görülmektedir.




Şekil 1.6 Fotokatod İşlevi

İşlev sırası olarak fotokatottan sonra gelen kısım Mikrokanallı Plakadır (MCP), fotokatodda oluşan foto-elektronlar MCP'yi geçerken yaklaşık $10^4$ kazanç ile yükseltilirler ( Mukund 1993). MCP çok ince cam bir plaka görünümünde olup, çok fazla sayıda (~2 milyon) ince kanaldan oluşmuştur. MCP ayrıntıları için Bender ve Biberman (2000)'e bakınız. Mikrokanallı plakalar günümüzde yüksek teknoloji ürünü olarak kontrollü askeri malzeme niteliğinde olup, sayılı ülkenin üretim yeteneği olduğu bir üründür.

**Görüntü yoğunlaştırıcı cihazların konfigürasyon gelişimi**

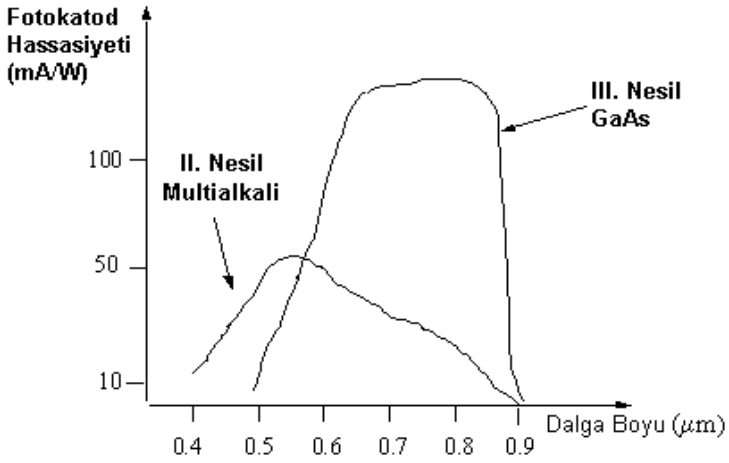
Gece görüş cihazları ile ilgili ilk çalışmalar 1940-1950 yılları arasında başlamıştır. Bu tarihte sıfırıncı (Gen0) nesil olarak adlandırılan gece görüş gözlükleri kullanıma alınmıştır. Bu gözlükler ışık kazancı sağlamaktan daha çok, kızıl ötesi dalga bandındaki görüntüyü görünür bölgedeki görüntüye çevirmektedir. Hedef bölge, kızıl ötesi dalga bandında çalışan filitreli lambalar ile aydınlatılmakta ve gece görüş gözlükleri bu görüntüyü görünür dalga bandında bir görüntüye dönüştürmektedir (Gül 2003). Aktif bir kaynak gerektirmeyen; pasif gece görüş tekniği, ilk defa 1960'lı yıllarda kullanılmıştır. Birinci nesil olarak adlandırılan bu tüplerde gürültünün çok yüksek düzeyde olması, ağırlığı ve boyutlarının büyüklüğü nedeniyle ikinci ve üçüncü nesil tüpler geliştirilmiştir (Bender ve Biberman 2000). İkinci nesil tüplerin üretimine 1970'li yıllarda geçilmiştir. İkinci nesil tüplerdeki gelişmeyi sağlayan en önemli faktör

mikrokanal plakanın kullanımıdır. Bu sayede tüp yaklaşık 3 cm uzunluğunda ve 4 cm çapında gerçekleştirilmiştir. Ağırlık ve boyutlardaki küçülmenin sağladığı bu avantaj gece görüş gözlüklerinin yaygın bir şekilde kullanımına olanak sağlamıştır. Üçüncü nesil tüpler; görüntü yoğunlaştırıcı tüp teknolojisinde fotokatot malzemenin Gallium Arsenide olarak seçilmesiyle; özellikle çok düşük ışık seviyelerinde yüksek kazanç elde edilmiş, 2+ nesillerde çok düşük ışık seviyelerinde ($2\times10^{-6}$ footcandle) kazanç 20.000 iken üçüncü nesil tüplerde 35.000 olabilmekte, ayrıca üçüncü nesil tüplerde fotokatot ve mikrokanal plaka arasına konan iyon tutucu film sayesinde mikrokanal plakadan geri dönen pozitif yüklü iyonların fotokatota dönüşü engellenerek tüp kullanım ömrü 3 kat artmıştır (Anonim 2003).

GenO, GenI, GenII, GenIII, vb. şekilde devam eden notasyon ile anılan görüntü yoğunlaştırıcı tüp ve sistemler notasyonda belirtildiği şekilde bir gelişme izlerken spektral tepki band genişliği, ebat, güç gereksinimi yönünden gittikçe daha kontrol edilebilir, küçük ve daha az akım ihtiyacı olan elemanlar haline gelmişlerdir. Konfigürasyonu etkileyen bir diğer özellik GYT'ün spektral tepkisidir, bu ise giriş penceresi de denilen fotokatotun spektral tepkisiyle belirlenir (Holst 1996). Kullanılan pencere materyalinin alınan sinyalin diğer katmanlardaki genliğini nasıl etkilediği görülmek istenirse; GaAs fotokatodun 810 nm dalga boyundaki hassasiyeti 150 mA/W olmasına karşın multialkali katotda bu değer yaklaşık 30 mA/W dır. Çizelge 1.1'de ikinci ve üçüncü nesil quantum verimliliği ve hassasiyeti karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Karşılaştırma için seçilen 810 nm dalga boyu için hassasiyet farkının ne kadar büyük olduğu şekil 1.7'de görülmektedir (Hall and Biberman 2000).

Çizelge 1.1 Gen II ve Gen III 810 nm'de Quantum verimliliği ve hassasiyeti

| | Gen II (Multialkali) | Gen III (GaAs) |
|---|---|---|
| Hassasiyet (mA/W) | 30 | 150 |
| Kuantum Verimliliği (%) | 5,2 | 23,2 |

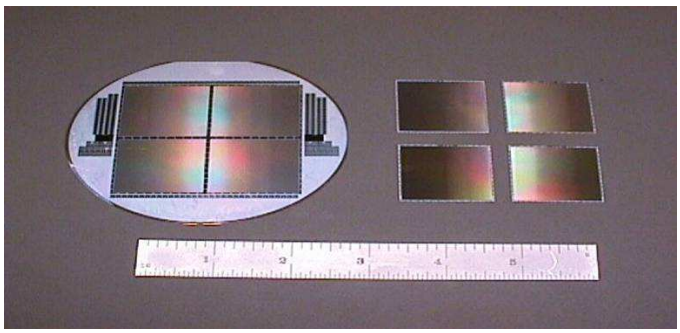



Şekil 1.7 II. ve III. nesil tüplerde fotokatod hassasiyetinin dalga boyuna bağlı değişimi

### 1.3 CCD (Charge Coupled Device)

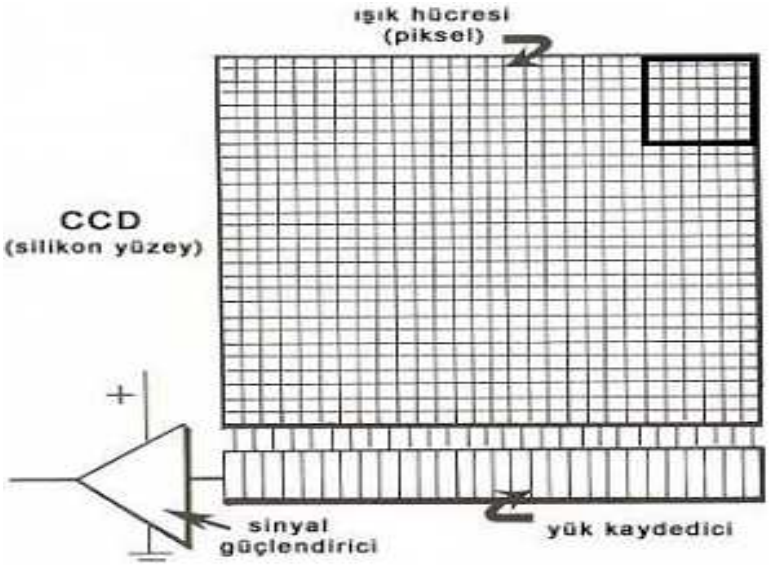
İngilizce "*Charge Coupled Device*" ifadesinin kısaltması olan CCD; yük çiftlendirici sistem veya eleman şeklinde açıklanabilen, opto-elektronik bir algılayıcı çeşididir.

Bir CCD dedektörü ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüşmekte, monitörün tersine bir işlev görmektedir. Şekil 1.8'de hazır bir CCD ürünü gösterilmiştir.



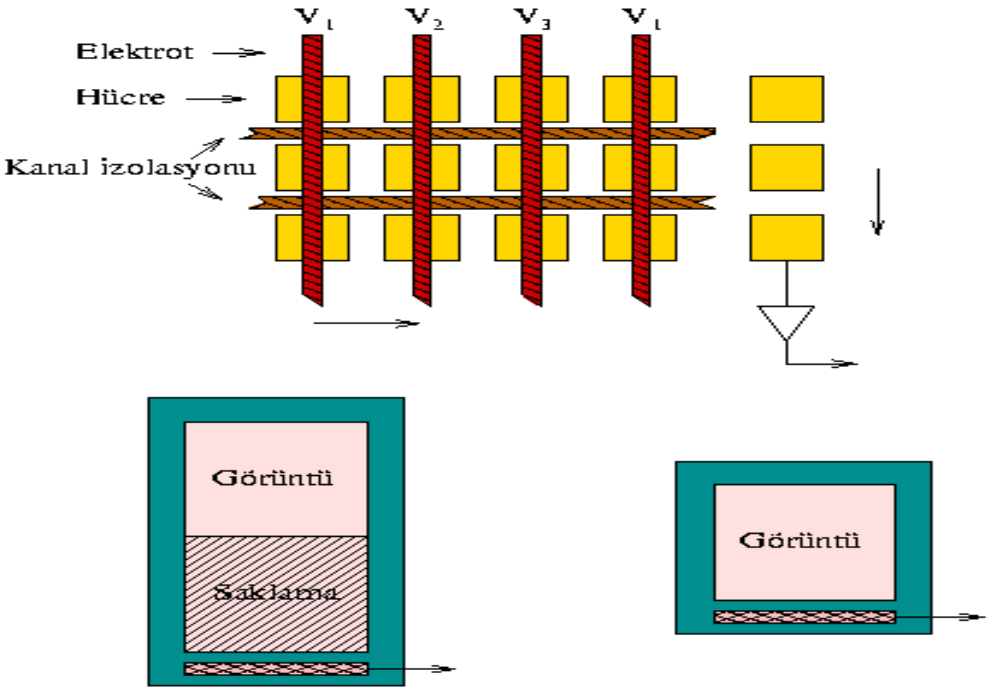
Şekil 1.8 Ürün olarak kullanıma hazır bir CCD örneği

Benzer olarak CCD'nin piksel matris yapısı şekil 1.9'da gösterilmiştir.




Şekil 1.9 CCD yüzeyi ve ışık hücreleri örneği

Her bir hücrede toplanmış yük sıra ile çıkış sütununa aktarılır, sonra bu sütun tekrar kaydırılarak sıra ile şekil 1.10'da gösterildiği şekilde okunur. Böylece matris üzerinde olan her hücre adresleri ile birlikte okunmuş olur (Rogalski 1995).



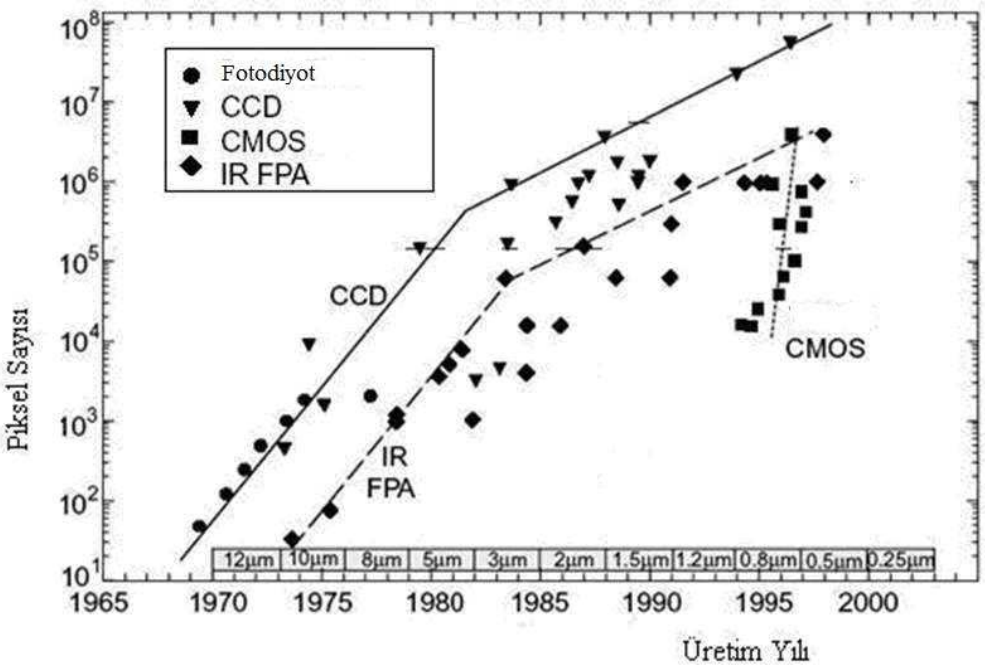

Şekil 1.10 CCD yapısı içinde oluşan görüntünün çıkışa taşınması

Burada bir analoji ile sinyalin taşınması anlatılmak istenirse; her bir pikseli bir su kovasına ve pozlanma süresince gelen ışını yağmur tanelerine benzetirsek; yağmur tanesi şeklinde gelen her foton dedektör (MOS-MIS kapasitör) üzerine düştükçe metal kapı (elektrot) ardında oluşturduğu elektron sinyal yükünü artıracak ve her bir pikselde değişik yük değerleri oluşacaktır. Herhangi bir fotoğraftaki kontrastı buna benzetirsek beyaz ve siyah arasında değer alan bir noktanın binlerce ve milyonlarcası bir araya geldiğinde gerçek görüntüyü oluşturacaktır.

CCD gelişim tarihçesi çizelge 1.2'de verilmiştir. Burada; 1970'li yıllarda üretilen ilk CCD modelleri ile 2000'li yılların milyonlarca piksel içeren ve seri-paralel bağlantılara olanak sağlayan yapısı ile gerçekte piksel sayısı sınırı aşılmış olan CCD dedektörlerin uygulama açısından ilk üretilenler ile bir benzerliği kalmamış olsa da; temel fiziksel işleyişi (foton-elektron dönüşümü ve elektron stoklama) büyük oranda aynı kalmıştır.

Çizelge 1.2 CCD'nin Tarihçesi

| | |
|---|---|
| 1969 Bell | Willard Boyle ve George Smith tekdizi 8 piksel led |
| 1973 JPL + NASA + TI | Astronomi için geniş alan CCD geliştirilmesi programı başladı |
| 1974 Fairchild | İlk astronomik CCD görüntüsü 100x100 piksel (Ay) |
| 1973-1977 TI | 100x160, 400x400, 800x800 piksel yonga |
| 1979 RCA | 320x512 sıvı azot soğutmalı sistem. (KPNO 1-m) |
| Ocak 2006 | Boyle ve Smith CCD üzerindeki çalışmaları sebebiyle "*National Academy of Engineering*" ödülü aldılar |




Şekil 1.11 CCD ve diğer sensör piksel sayılarının tarihsel gelişimi (Kozlowski 1998)

Çizelge 1.2'de genel tarihsel gelişim süreci gösterilen CCD'nin şekil 1.11'de diğer sensörler ile birlikte görülen ve yıllara bağlı gittikçe fiziksel büyüklüğünün (piksel ebatının) küçülmesi sayesinde;

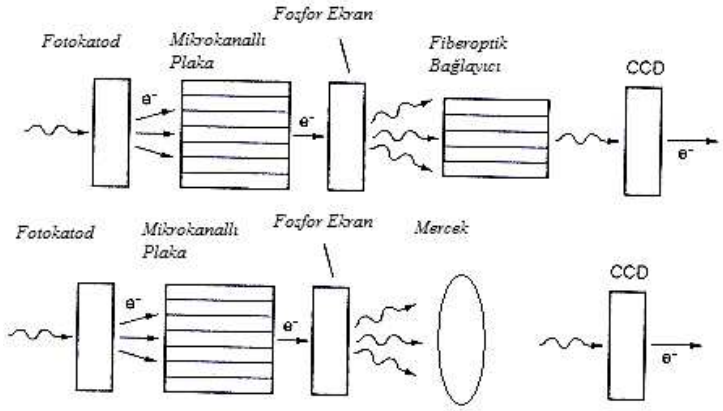
i. Algılama hassasiyeti artmış, yani daha küçük ayrıntıları (1990 lardan itibaren mikron seviyesinde) görüntüler hale gelmiş,

ii. Daha küçük boyutta fakat daha çok pikselli sensör üretimi artmış; bu ise aynı zamanda üzerinde toplanan ışık enerjisinin artmasını sağlamıştır.

Burada önemli bir ilerleme de mikrolenslerin gelişmesi ile ilgilidir. Mikro lensler tipik olarak CCD ve CMOS vb. görüntüleyiciler de kullanılmaktadır. Her pikselin üzerine inşa edilen mikrolensler gelen ışığı foto duyarlı bölgenin üzerine odaklar, Doldurma Faktörü (*Filling Factor*) düşük olduğu ve mikrolenslerin kullanılmadığı durumda, ışık herhangi bir yere düştüğünde kaybolur veya bazı durumlarda, aktif devredeki elektriksel akımların ürettiği istenmeyen görüntü bozukluklarına yol açar (Holst 1996 ve Koçer 2006).

## 1.4 ICCD/ICMOS Cihazı

CCD kameranın GYT'e adapte edilmesi ile elde edilen yapı ICCD olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1.12'de bir çok birleştirme yönteminden sadece ikisi gösterilerek ICCD'nin çalışma kurgusu basitçe ifade edilmektedir[3] (Holst 1996).




Şekil 1.12 ICCD temel gösterimi; üst tarafta fiber optik ve alt tarafta mercek ile uyumlandırılmış ICCD yapısı gösterilmektedir (Gül 2003)



(a) (b)

Şekil 1.13 Çalışmalar sırasında yapılan 2 adet ICCD a. Akita CCD kamera, b. Pulnix CCD kamera kullanılmıştır

Kapalı alan veya çevre güvenlik kamerası olarak kullanılan CCD kameralara, şekil 1.13'de gösterildiği şekilde "Görüntü Yoğunlaştırıcı Tüp" (GYT) eklendiğinde, ICCD olarak adlandırılırlar. CCD ile görüntülenemeyen ortam, ICCD ile görüntülenebilmektedir. ICCD cihazının da algılama yapamadığı düşük ışıma koşullarında ($10^{-6}$ ftcd) ise aktif görüntüleme yöntemi kullanılarak, hedef aydınlatması yapılarak ortamın görüntülenmesi sağlanmaktadır (Örnek bir uygulama olan ALBEDOS projesi ile ilgili genel bilgiler Ek-1'de sunulmuştur ).

2 Burada CCD yerine CMOS dedektör kullanıldığında ICMOS yapısı elde edilir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

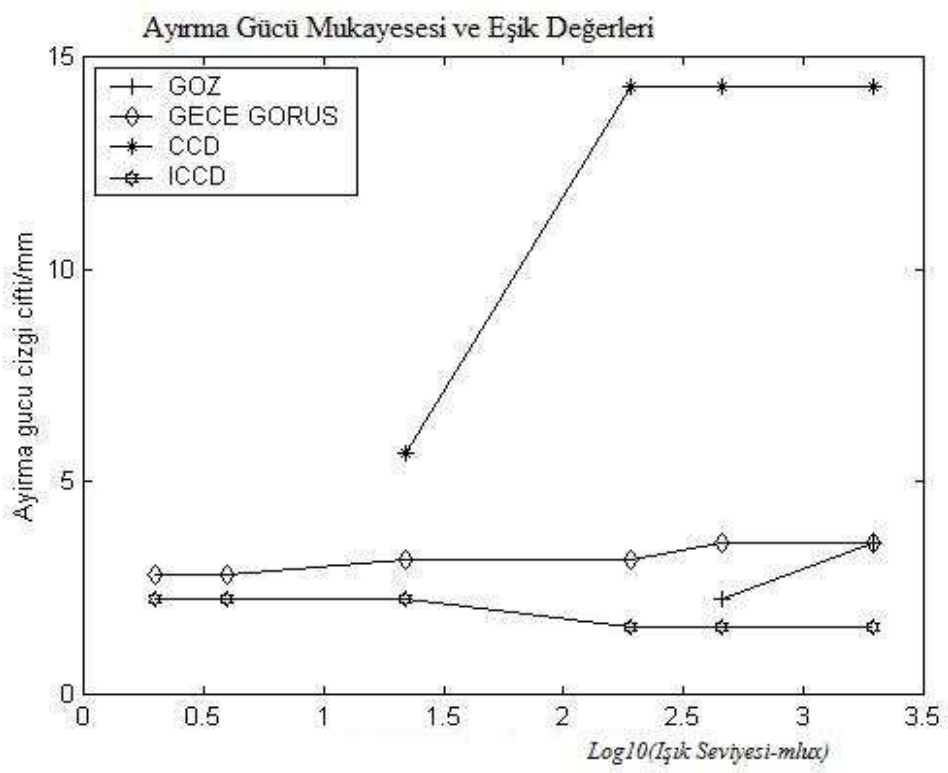
Gece görüş sistemleri, başta askeri araç ve sistemler olmak üzere takıldıkları veya entegre edildikleri cihazda/sistemde arama, gözetleme ve hedef tespiti amaçları için kullanılan algılayıcı birimini oluştururlar. Kullanılan gece görüş cihazının algılayıcı elemanının dalga boyu hassasiyeti gece görüş cihazının hangi dalga boyunda etkin olarak kullanılabileceğini gösterir. Şekil 1.2 ve şekil 1.3'de görülen ve sırasıyla atmosferin geçirgenliği ile insan gözü ve CCD/CMOS sensörlerinin spektral hassasiyetini dalgaboyu cinsinden gösteren algılama pencereleri gece görüş tekniklerinin uygulama alanlarında belirleyici bir rol oynamaktadır. Buna ilave olarak, ortamın ışık ve klimatik karekterizasyonu da hem seçilecek algılama yönteminin pasif veya aktif sistem olup olmamasını, hem de sistemde kullanılan algılayıcı biriminin sensörünün etkin olduğu dalgaboyunu belirlemektedir. Örneğin bazı sistemler için termal sistem seçimi ile gece görüş cihaz tipinin seçim süreci tamamlanabilmekte; ayrıca algılayıcının 3-5 mikron veya 8-12 mikron dalgaboyunda algılama yapması gerektiği koşulunun yerine getirilmesi yeterli olabilmektedir. Oysa havadan yere (uçak, helikopter, insansız hava aracı), denizden karaya, karadan denize, karadan karaya ve karadan havaya olabilecek gece görüş uygulamalarında, her bir duruma ait; ortam atmosferik geçirgenliği, gece veya gündüz kullanım zamanı için üretilmesi istenen teknik bilginin (genellikle görüntü verisi) cinsinin belirlenmesi gerekmektedir. Burada teknik olarak birbirine benzemekle birlikte sensörün soğutuculu veya soğutucusuz olması ile; atmosferik geçirgenliğe bağlı olarak çift pencereli[4] seçeneğin tercih edilmesi de sistemin algılama mesafesi sınırına da bağlı olarak uygulanacak yöntemi etkilemektedir (Wolfe 1996). Bu bölümde gece görüş sistem seçimlerinde etkili olan pasif-aktif algılama; MTF, ayırma gücü ölçümü, aktif sistem aydınlatma kaynağı seçiminde dalgaboyu analizi ve aktif görüntüleme yöntemine etkisi incelenerek, bu parametrik performans analizinin birbirini nasıl etkilediği ile sistem karakterizasyonu hakkında ne gibi sonuçlar verdiği belirtilecektir.

---

[4] Tasarıma göre 3-5 veya 8-12 mikron dalga boyunda görüntü alınmasının seçilebilir hale getirilmesi, gerektiğinde 3-5 ve 8-12 mikron dalga boyu bandında elde edilen görüntülerin üst üste bindirilmesi tekniğidir.

## 2.1 Pasif-Aktif Algılama

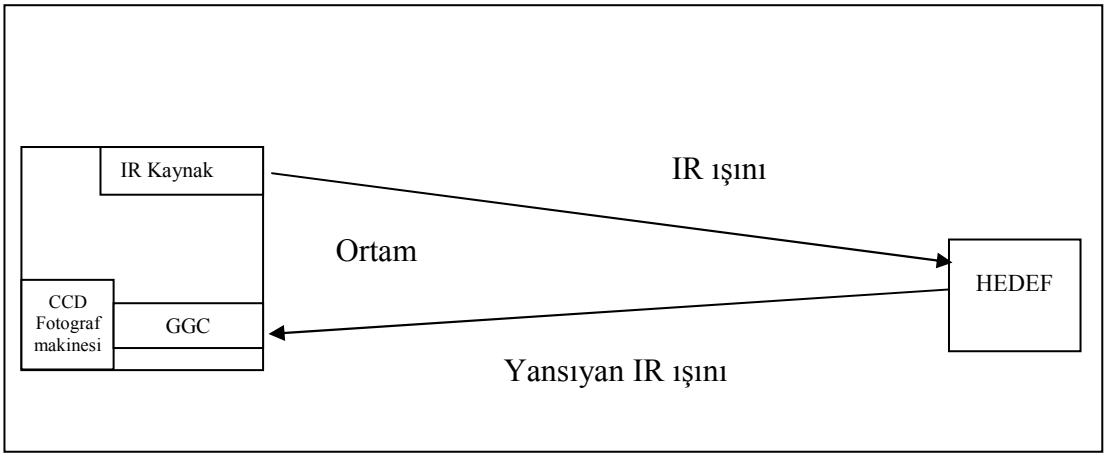
Termal görüntüleme sistemlerinin dışında kalan pasif sistemlerdeki görüntü algılamanın esas unsuru; ortamda var olan, hedef nesneden yansıyan ışığın bir giriş optiğinden geçerek üzerine düştüğü algılayıcı vasıtasıyla algılanarak uygun bir optik/elektro-optik aksamdan geçirilerek kullanıcıya görüntünün ulaştırılması veya görüntünün kayıt altına alınmasıdır (Bosch 2000). Bu pasif sistemler de kendi özelliklerine bağlı olarak hem algıladıkları spektral band hem de ortamdaki ışığa göre ayırma gücü açısından farklılık göstermektedirler. Bu sebeple yapılan çalışmalara referans olması bağlamında insan gözü, CCD, GGC ve ICCD pasif algılayıcı sistemleri ile deneysel çalışma yapılmış, sonuçları ve ayırma gücü mukayeseleri (Gül ve Efe 2003) verilmiştir, elde edilen veriler 5. Ulusal Optik, Elektro-optik ve Fotonik Çalışma Toplantısında sunulmuştur (Ek 2) . Burada 6 adet ayarlı ışık seviyesinde karşılaştırılan söz konusu algılayıcıların belirlenen eşik değerleri şekil 2.1'de görülmektedir.




Şekil 2.1 Pasif algılayıcıların ayırma gücü mukayesesi ve eşik değerleri (Gül ve Efe 2003)

Şekil 2.1'de görülen algılayıcı performans değerlerine göre düşük ışık koşullarına göre hangi algılayıcının daha iyi olduğu görülmekle birlikte, özellikle aysız geceye denk

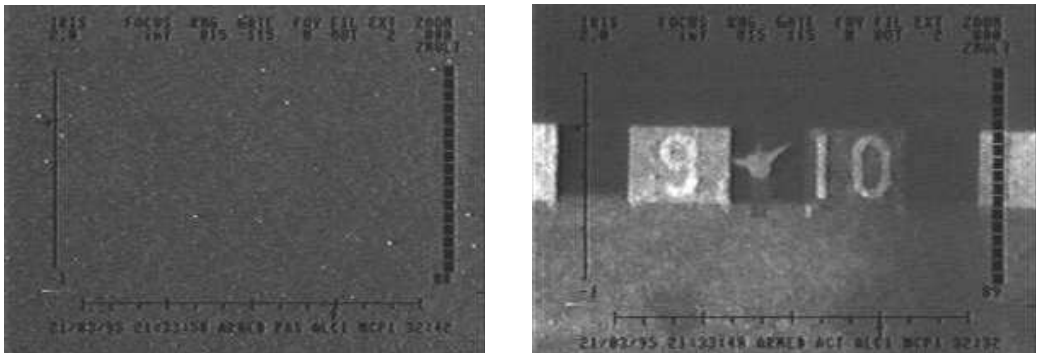
gelen çok düşük ışık (4 mililux (0,3716 mftcd)) seviyesinden itibaren sonuç değişmemekte, yani pasif sistemler ile görüntü alınamamaktadır. Bu ayırma gücü sınırlaması, üretim süreçlerinde ölçülen değerlere yakın bir değerdir. Delft Electronic Products (DEP) görüntü yoğunlaştırıcı tüpleri için bu değeri (Bosch 2000) "foton sayma sınırı" veya "düşük ışık seviyesi sınırı" ifadesi ile, yaklaşık 1 mililux olarak vermektedir. Pasif sistemlerin algılaması için ortamda düşük seviyede de olsa ışık bulunmasının gerekliliği; gece görüş tekniği açısından termal sistemlere bir avantaj sağlamaktadır. Çünkü termal sistemlerin algılaması için hedefe yönlendirilmesi ve hedeften yansıması gereken doğal veya yapay bir ışık/ışınım gereksinimi yoktur; mutlak sıfır üzerindeki her nesne "Termal Işınım Kuramına" göre, hedef nesne ile arka plan mutlak sıcaklık farkına göre ve ışınım kontrastına bağlı olarak bir ışınım yapmaktadır (Lloyd 1982). Termal sistemlerin bu üstünlüğü, pasif sistemler açısından zaafiyet olarak görülmektedir. Pasif sistemlerdeki ışık olmadığı durumlardaki algılamama zaafiyetinin giderilmesi için hedefin uygun ışınım kaynağı ile aydınlatılması gerekmektedir. Bu açığı gidermek amacıyla geliştirilen aktif sistemlerin temel çalışma prensibi şekil 2.2'de görülmektedir.




Şekil 2.2 IR Kaynaklı aktif görüntülemenin temel çalışma prensibi
(Ölçeklendirme yapılmamıştır)

Şekil 2.2'de temel çalışma prensibi görülen aktif görüntülemede IR kaynak yerine uygun laser kaynak da kullanılabilmektedir. Ayrıca görüntüleme performansının ortam gürültüsünden mümkün olduğunca az etkilenmesi açısından, laser ile ICCD'nin anahtarlama yöntemi ile senkronizasyonu sağlandığında, bir kaç ns süreli pozlar

alınarak aktif sistemin kullanım etkinliği daha da arttırılabilmektedir. Bu şekilde açık sahalarda arama kurtarma faaliyetleri için tasarlanması sebebiyle yüksek aydınlatma gücü gereksinimi duyulan bir aktif görüntüleme çalışması örneği şekil 2.3'de görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 2.3 IR kaynağı ile aktif görüntüleme çalışmasına bir örnek. a. Işınım kaynağı çalıştırılmadan, b. Kaynak çalışırken 900 m den alınan görüntüdür[5]

Şekil 2.3.a'daki karanlık görüntü pasif sistemlerdeki düşük ışık seviyesi sınırının altında görüntü alınamadığını göstermektedir. Şekil 2.3.b'deki görüntü ise, ortamın uygun ışın kaynağı ile aydınlatıldığında görüntünün alınabildiğini göstermektedir. Bu görüntüde iki adet yaklaşık 2,5x2,5 m'lik plakalar arasında bir insan görülmektedir. Aydınlatmalar insan gözünün algılama sınırının üzerinde bir dalgaboyunda (800+ nm) yapıldığından çıplak gözle bakan denek ortamı göremezken, aynı ortamdaki aktif sistem kullanıcıları ortamı görebilmekte, kayıt yapabilmektedir.

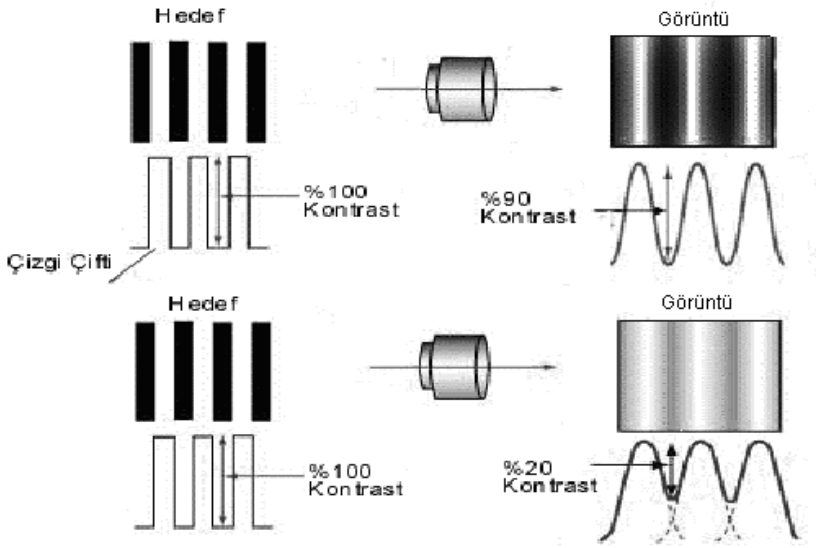
Bu çalışmada şekil 2.2'de görülen prensiple çalışan bir aktif görüntüleme sistemi modellenerek, MTF analizi yapılmak suretiyle incelenmiştir. Sistemin işlevselliğinin tespit edilmesi ve analitik modelin teknik analizinin yapılarak etkin parametrelerinin belirlenebilmesi açısından şekil 2.3'deki aktif sistemin küçük ölçekli bir laboratuar örneği geliştirilmiştir. Geliştirilen örnekte ortamda aydınlatma varsa görüntü alınabilmekte, IR kaynak ile aydınlatma olmadığı zaman ise ICCD ile görüntü alınamamaktadır. Gerçekleştirilen IR kaynaklı ICCD'li aktif sistem, hazır olarak temin edilen IR ledli CCD güvenlik kamerası ile de aynı koşullar altında görüntü almak suretiyle mukayese edilerek sonuçları çalışmaya dahil edilmiştir.

[5] DRDC Valcartier 2002-04 ALBEDOS trial scene, at 900 m .

## 2.2 Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF)

Bir optik sistemin ne kadar iyi performans gösterdiği, genelde en uzak mesafeden ayırt edebildiği en küçük nesne ile belirlenmektedir. Askeri standartlarda bu ilişki çoğunlukla, minimum ayırt edilebilir kontrast (MRC) ölçütü ile verilmektedir (termal sistemlerde ise yaygın olarak MRTD kullanılmaktadır). Hedef nesne ile test edilen optik/elektro-optik sistemin performans ilişkisini çevresel koşulları da dikkate alarak değerlendiren bir diğer parametre ise; Minimum Ölçülebilir Modülasyon Seviyesi (MÖMS) veya Gürültü Eşdeğeri Modülasyon Seviyesi yani NEM ölçütü ile verilmesidir. Bu ölçütler, kullanıcının sistem parametrelerini ölçerken belirlediği en düşük sınırları da göstermektedir. Diğer taraftan bu parametreler elde edilirken yararlanılan ana performans ölçüm bilgisi, sistemin uzaysal frekans esaslı tepkisini çizgi çifti/mm veya devir/mm birimi ile gösteren MTF'dir. Bir optik/elektro-optik sistemin MTF'i; o sistemin giriş nesnesinin kontrastının, sisteme özgü bir çözünürlük seviyesinde çıkışa, yani faydalanılan görüntüye aktarma yeteneğidir. Başka bir ifadeyle MTF, çözünürlüğü ve kontrast aktarımını tek bir özellik olarak birleştirmenin yoludur. Bu sayededir ki uygulamada MÖMS vb. eşik bilgileri kullanılarak sistemler hakkında daha gerçekci yorumlar yapmak mümkün olabilmektedir. Örneğin görsellik açısından yüksek MTF değerleri o sistemin net görüntü aldığını, düşük MTF değerleri ise zayıf görüntü alındığını göstermektedir. Net görüntü veya zayıf görüntü olarak adlandırılan bu görüntü alma kalitesi sistemin uzaysal frekans tepkisine bağlıdır. MTF'i açıklamanın belki de en kolay yolu, yüzde yüz kontrastı gösteren siyah ve beyaz çizgilerden oluşan bir hedefi düşünmektir. Kırınım sınırı özelliğinden dolayı hiçbir optik sistemin, herhangi bir çözünürlük değerinde bu kontrastı görüntüye tamamiyle aktaramayacağı bilenen bir gerçektir. Işınların bir odakta toplanamaması halinde ortaya çıkan görüntü kaybı yani sapma, uygun optik teknikler kullanılarak önlenmesi mümkün olduğu halde, ışınların yansımalarda ve geçiş noktalarında oluşturduğu sapmalar sebebiyle oluşan görüntü kaybı yani kırınım, ışığın doğal yapısından kaynaklandığından, en uygun tasarımla oluşturulan optik ve/veya elektro-optik sistemde bile önlenemez. Bu nedenle gerçekte bütün optik/elektro-optik sistemler "kırınım-sınırlı"dır (Abbott 1980). Kırınım-sınırlı herhangi bir sistemin performansını gösteren MTF'i en yaygın belirleme yöntemi olarak üçlü bar hedefin fotokatodun girişine verilip, fosfor ekrandan ayırt edilebilen çıkış görüntüsüne bakarak denk gelen üçlü bar hedefini yani çıkış MTF'ini tespit etmek

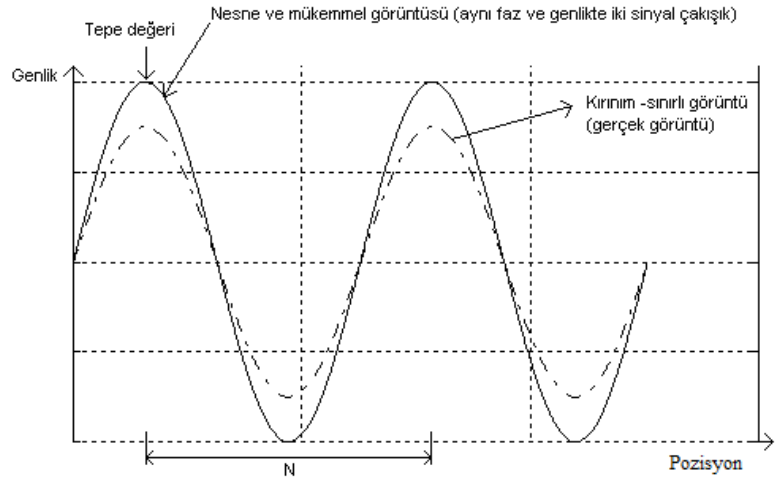
olarak görülmekte ve 1970'den beri kullanılmaktadır (Biberman 2000). Bu yöntemde sistemin Fourier tepkisinin ölçüsü, uzaysal frekans girdilerine, yani mm başına düşen çizgi çifti cinsinden hedef test nesnesine optik /elektro-optik sistemin verdiği tepki, ilgili çizgisel hedef nesnesinin algılanma derecesi ile ölçülür. Bir hedefteki çizgi çifti arasındaki boşluk genişliği azaldıkça yani uzaysal frekansı arttıkça; optik /elektro-optik sistem için bu kontrastı verimli bir şekilde çıkışa aktarmak da gittikçe zorlaşır. Bu uzaysal frekans kontrast aktarma ilişkisi şekil 2.4'de görülmektedir. Şekil 2.4'den görüldüğü gibi; frekans yükseldikçe görüntünün kontrastı düşer ve ayrıntıların algılanması zorlaşır. Uzaysal frekansın bir fonksiyonu olarak kontrastın aktarılmış kısmı ile ilgili olan MTF grafiği, çizgisel frekansa bağlı performans azalmasını göstermenin bir yöntemidir.




Şekil 2.4 Sistemin MTF değeri azaldıkça ayırt edilen kontrastın azalması

Ancak; MTF her ne kadar optik/elektro-optik sistemlerin bir bütün olarak görüntü oluşturma yeteneğini nesnel olarak değerlendirmede önemli bir yere sahip olsa da, sonuçları genellikle deneysel olarak ve sistemin bütünlüğü açısından elde edildiğinden; araştırmacılara sonucun daha iyi olması için hangi arabirimde ne yapmak gerektiğine dair hiçbir ipucu vermez, bu da performans iyileştirmeleri ve ölçümünde analitik açıdan araştırmacıları çözümsüz bırakmaktadır (Abbott 1980). Diğer taraftan; elektro-optik sistemlerdeki ayırma gücü ile ilgili olarak en iyi ayırma gücüne sahip mercek veya optik

aksamın elektronik aksam ile birlikte kullanımında MTF açısından en iyi sonucu vermeyebileceği de bilinmektedir (Abbott 1980). Bir optik sistemin uzaysal frekans tepkisine bakarak ayırma gücüne ilişkin genel değerlendirmesinin yapılabildiği ve bu frekans tepkisinin elektronik sistemlerdeki transfer fonksiyonuna benzediği Wolfe tarafından açıklanmaktadır (Wolfe 1996). MTF' in uzaysal frekansa tepkisinin Gaussian ve band geçiren karakteristiği olduğu, yüksek frekansları zayıflattığı literatürde sıklıkla yer almaktadır (Subbarao 1993 ve Boreman 2001). Bir optik sistemin test nesnesi ile en uygun testi; hedef nesnesinin ve onun mükemmel görüntüsünün sinüzoidal olduğu durumdur (Abbott 1980).




Şekil 2.5 Sinüs dalga test nesnesi ve kırınım-sınırlı genlik görüntüsü

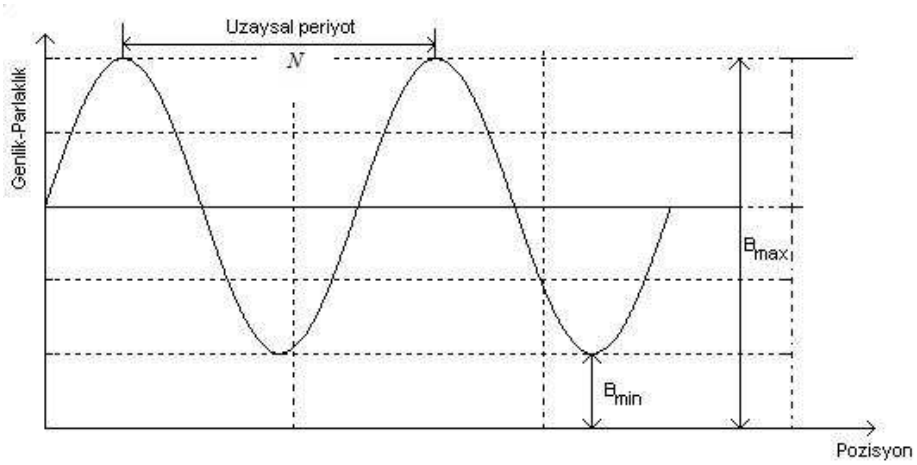
Gerçek görüntüyü gösteren kırınım-sınırlı görüntünün genliği her zaman gerçek görüntünün genliğine göre kayıplıdır, yani düşük genliklidir (Abbott 1980). Şekil 2.5'deki gibi ard arda gelen hedef tepe değerlerinin arasındaki uzaklık milimetre cinsinden N olursa, hedefin uzaysal frekansı, Eşitlik 2.1'deki gibi;

$$R = 1/N \text{ (devir/mm}^6\text{)} \qquad (2.1)$$

şeklinde tanımlanır (Abbott 1980).

[6] Uzaysal frekansın bu gösterimi genellikle bütünleşik optik sistem esaslı olup, cihaz ayırma gücü ölçümlerinde bu terim, çizgi çifti/mm olarak geçmektedir

Şekil 2.5'deki grafikten sadece kırınım-sınırlı gerçek görüntüyü tekrar çizip eksenel ayarlamayı da yaparsak; $B_{max,}$ bozulmadan önceki genlik değeri ve $B_{min,}$ genlik olarak bozulmanın tamamını gösteren değerler olmak üzere şekil 2.6'daki genlik bulunur.




Şekil 2.6 Modülasyon kriterleri (Boreman 2001)

Şekil 2.6'daki $B_{max}$ ve $B_{min}$ değerlerine göre bir optik sistemdeki modülasyon tanımı Holst (1995) tarafından Eşitlik 2.2'deki gibi tanımlanmaktadır.

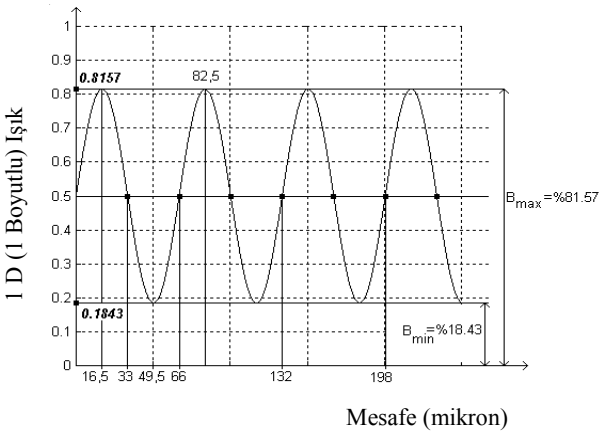
$$\text{Modülasyon} = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{max} + B_{min}} \tag{2.2}$$

Burada $B_{min}$ ve $B_{max}$ sırasıyla en düşük ve en yüksek genlik şiddet seviyesidir.

MTF bir mercek veya optik sistemde, kontrasta bağlı olarak, çıkış modülasyonunun giriş modülasyonuna oranıdır, bu sebeple MTF hedefin sistem tarafından görüntüye çevrilme performansını gösteren objektif bir ölçümdür (Wolfe 1996). MTF uygulamalarına ilişkin olarak öncelikle sadece optik sistemler için çalışma gözlenirken, son yirmi yılda elektro-optik sistemlerde de MTF uygulama çalışmaları yaygınlaşmıştır (Boreman 2001). Optik/elektro- optik sistemler için önerilen birçok analitik MTF tanımlaması olsa da, bunlar genelde deneylerle elde edilmiş verilerle tam olarak uyumlu

değildir. Ticari MTF ölçüm sistemlerinin doğruluğu mutlak MTF' in % 5-%10 hata aralığında iken, bununla birlikte %1 doğruluk ile MTF ölçümleri elde etmek de mümkündür (Boreman 2001). Bu sebeple deneylerle elde edilen MTF değeriyle daha uyumlu bir analitik ifadenin varlığı, araştırmacıların/üreticilerin optik sistemin görüntü kalitesini daha iyi tespit etmelerinde tasarım aşamasında yardımcı olacaktır. Analitik ifadeler, sistemlerin modelleme aşamasında kullanıldığından ve tüm sistemin gerçeklenmesine gerek olmadan, başlangıçta sistemden beklenen performansın görülmesinde güçlü bir araç olduğundan daha önemlidir. Böylece, matematiksel olarak daha doğru olarak kurgulanmış bir model ile sistem performans beklentilerini gerçek modele daha yakın olarak simule edilmesine yardımcı olunacaktır. Bunun da ötesinde gerçek sisteme sahip olmadan sistemin fonksiyonelliğini simule etmek amacıyla geliştirilen eğitim amaçlı sistemler de vardır. Bu tip sistemler gerçek sistemin matematiksel modellerine dayanırlar ve daha az doğrulukta bir sonuç veren matematiksel model ile kurgulandıklarında eğitim sisteminin daha düşük performans göstermesine neden olurlar. Bu çalışmada Holst (1996) tarafından sunulan MTF analitik formülü OMNI serisi 3. nesil GYT için modifiye edilerek askeri standartlarda verilen sonuçlara en iyi uyum sağlayacak şekilde regüle edilmiştir (Anonim 1989). Regüle edilmiş analitik ifade kullanılarak 3'üncü nesil bir GGC ile yapılan ICCD için analitik MTF formülasyonu önerilmiş ve elde edilen sonuçlar, Williams'ın (1995)'de verdiği ICCD MTF değeri ile mukayese edilmiştir. Regülasyon çalışmasının diğer cins GYT'lere de uygulanabilir olduğunu göstermek için yukarıda anılan MTF formülü uygun katsayılar ile gerçekleştirilmiştir. Burada da ölçülen MTF değerine göre hatası % 20'lerde olan analitik olarak hesaplanan MTF hataları regülasyon sayesinde ortalamada % 3'lere çekilmiştir.

Sistem değerlendirmesinde bu kadar genel bir katkı sağlayan MTF'in nasıl elde edildiği konusu şekil 2.7'deki örnek ile incelenecek olursa, her bir görüntünün 1 boyutlu profil sinyallerinin bir bileşkesi olduğu düşünüldüğünde, incelenen her bir bileşke uzaysal frekans için tek tek modülasyon sonucu bulunur ve frekans değişimine karşı maruz kalınan modülasyon oranı birleştirilerek modülasyon transfer fonksiyonu elde edilmiş olur (Boreman 2001).



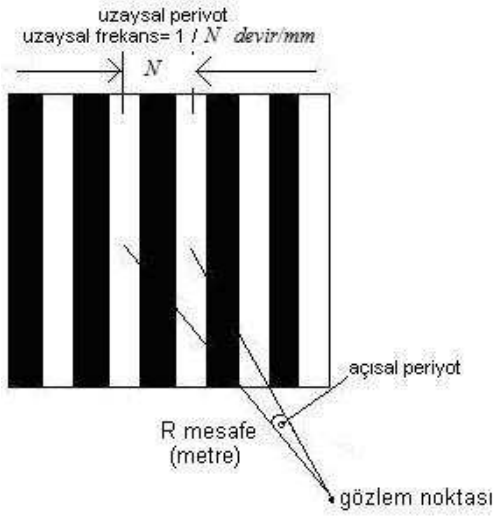

Şekil 2.7 1.D (1 boyutlu) Işık Profili

Şekil 2.7'deki değerler Eşitlik 2.2'de yerine konursa;

$$M = \frac{0,8157 - 0,1843}{0,8157 + 0,1843} = 0,6314 \quad : \quad \%63,14 \text{ bulunur.} \tag{2.3}$$

Uzaysal periyot Şekil 2.7'den;

82.5- 16.5= 66 mikron olarak hesaplanmaktadır. (2.4)




$$\Theta = X/R, \qquad f_{au} = R/X, \tag{2.5}$$

Burada;

$f_{au}$: açısal uzaysal frekans,

R: mesafe; Θ: açısal periyot,

Örnekteki uzaysal periyot 66 mikron olduğundan;

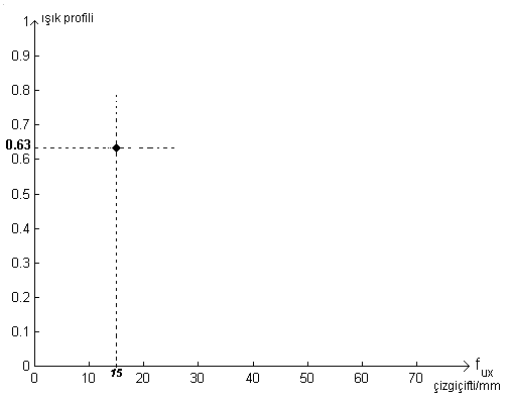
Şekil 2.8 Açısal uzaysal frekans (Boreman 1998).

$$X = 66 \times 10^{-3} \text{ mm} \tag{2.6}$$

$$f_{aux} = \frac{1}{x} = \frac{1}{66x10^{-3}\,mm} = 15 \text{ çizgi çifti /mm.} \tag{2.7}$$

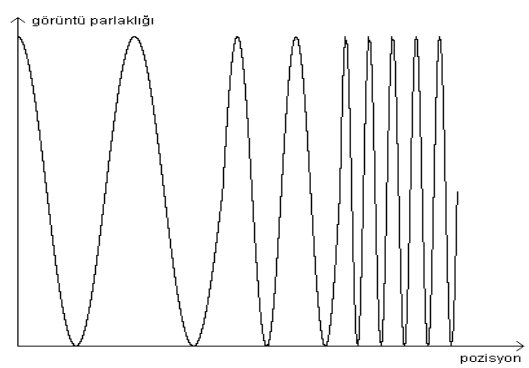
$f_{aux}$; frekansın x ekseninde alındığını gösteriyor.

$f_{aux}$ = 15 çizgi çifti/mm olan frekanstaki modülasyon % 63,14 yani 0,63 bulunduğundan, tek bir frekans için MTF grafiğinde yerine konursa,

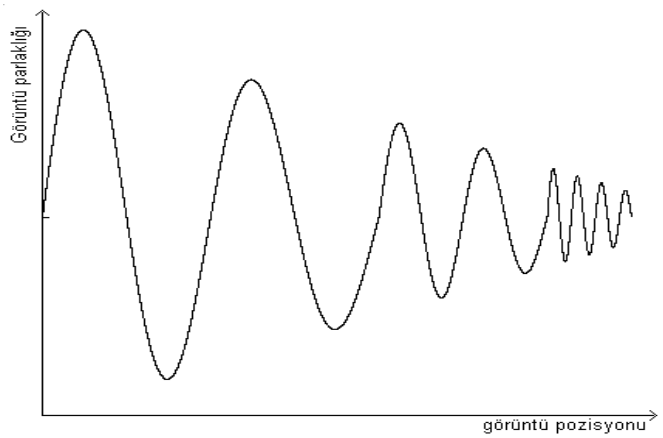



Şekil 2.9 15 çizgi çifti/mm uzaysal frekansta modülasyon değerinin bulunması

15 çizgiçifti/mm işaretlenip genlik ekseninde de % 63,14'i bulunur ve böylece MTF üzerindeki bir nokta şekil 2.9'daki gibi tespit edilmiş olur. Diğer uzaysal frekanslara modülasyon tepkisi de tek tek hesaplanıp işaretlenir ve daha sonra da birleştirilirse MTF tek bir çizgisel eğri olarak elde edilir. Şekil 2.10'da değişik frekanslarda giriş sinyali ve şekil 2.11'de ona denk gelen rastgele bir sistemin çıkış sinyali görülmektedir. MTF değerlerini bulurken; giriş birim genlikte değişik frekanslarda sinüzoidal sinyal kabul edilirse, sistemin çıkışı doğrudan MTF'i verecektir.

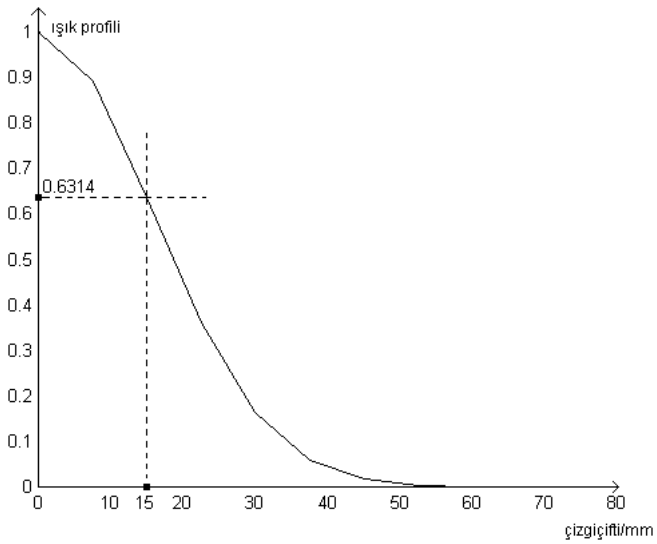



Şekil 2.10 Giriş ( görüntülenen nesne)




Şekil 2.11 Çıkış

Sistemin tepkisi girişe bağlı olarak çizilecek olursa, bu MTF'yi vereceğinden, nesnenin sistem çıkışındaki görüntüsünden şekil 2.12'deki MTF profili çıkarılmaktadır. MTF konusundaki diğer ayrıntılar için (Seyrafi 1985, Boreman 2001 ve Gül 2003)'e bakınız.

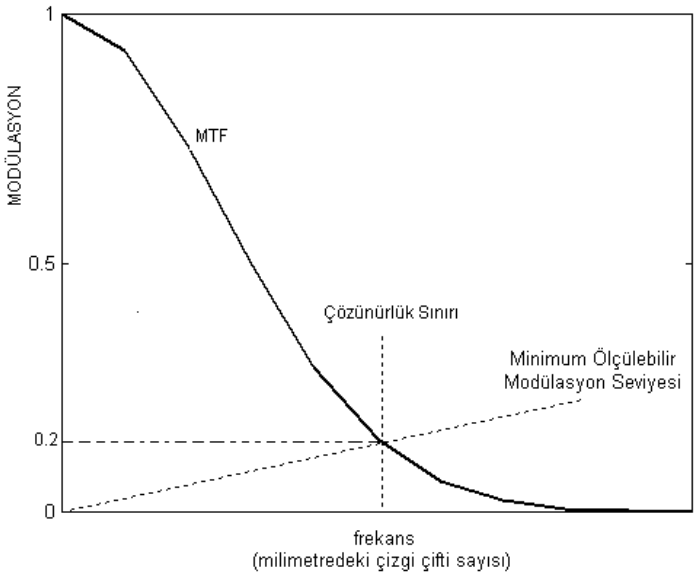



Şekil 2.12 MTF'in uzaysal frekans ile değişimi

## 2.3 Ayırma Gücü Ölçümü

Yukarıda nasıl elde edildiği ifade edilen MTF'in ayırma gücü ile ilgili olarak da nasıl kullanılabileceği incelenecek olursa; MTF eğrisi ile sistemin Minimum Ölçülebilir Modülasyon Seviyesi (MÖMS) yani Gürültü Eşdeğeri Modülasyon Seviyesi çizgisinin

kesiştiği nokta; şekil 2.13'de görüldüğü üzere "ayırma gücü-çözünürlük" sınırını vermektedir (Boreman 2001).



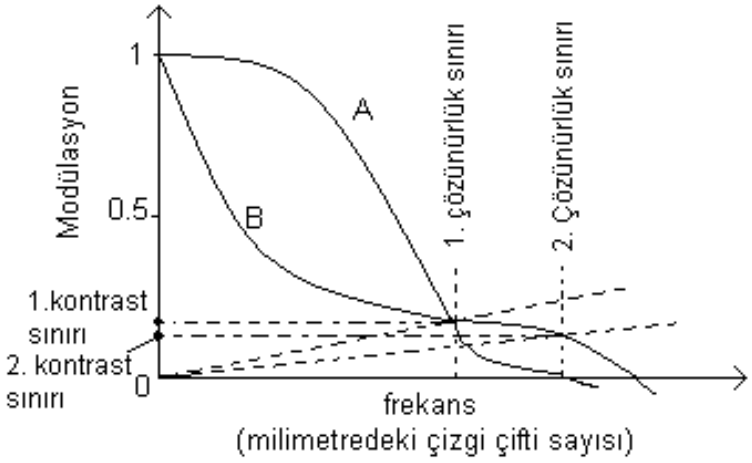

Şekil 2.13 Gürültü Eşdeğeri Modülasyon Seviyesi (çözünürlük sınırı)

Diğer taraftan, sistem performansı sadece çözünürlük sınırına bakarak anlaşılmayabilmektedir; örnek üzerinde gösterilecek olursak şekil 2.14'de A ve B aynı ayırma gücüne sahip olmasına rağmen, A ile temsil edilen sistem daha iyi görüntü oluşturacaktır, çünkü A'nın düşük frekanslardaki kontrastı daha iyidir.




Şekil 2.14 A ve B iki farklı MTF

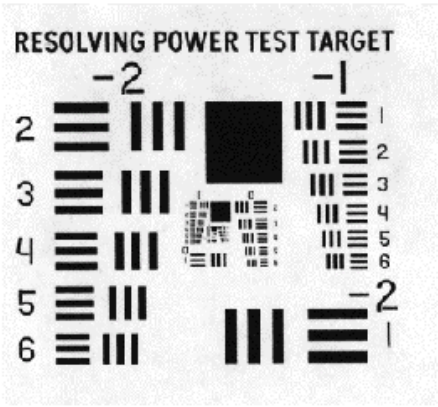
Şekil 2.15'de ise A'nın kontrastı büyük, B nin ise ayırma gücü daha iyidir. Bu durumda karar, kontrastın ayırma gücüne göre göreceli önemine dayanmak zorundadır. Tercih kullanıcıya bırakılmaktadır.




Şekil 2.15 Ayırma gücü ve kontrast sınır değişimi

## 2.4 MTF ve Ayırma Gücü Analizi ile ilgili İlave Bilgiler

MTF Hedefleri çok çeşitli olmasına rağmen 1970 yılından beri en yaygın kullanılanı USAF 1951 ABD Askeri standart hedefidir (Biberman, 2000). Şekil 2.16'da USAF 1951 üçlü bar hedef gösterilmektedir. Her bir hedef grubu ve elemanın gösterdiği ayırma gücü değeri çizelge 2.1'de verilmiştir.




Şekil 2.16 USAF 1951 ABD Askeri standart hedefi (Anonim 1993)

Çizelge 2.1 USAF 1951 Ayırma Gücü Tablosu*

| Eleman | Grup Numarası | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **-2** | **-1** | **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** |
| **1** | 0,250 | 0,500 | 1,00 | 2,00 | 4,00 | 8,00 | 16,00 | 32,0 | 64,0 | 128,0 |
| **2** | 0,280 | 0,561 | 1,12 | 2,24 | 4,49 | 8,98 | 17,95 | 36,0 | 71,8 | 144,0 |
| **3** | 0,315 | 0,630 | 1,26 | 2,52 | 5,04 | 10,10 | 20,16 | 40,3 | 80,6 | 161,0 |
| **4** | 0,353 | 0,707 | 1,41 | 2,83 | 5,66 | 11,30 | 22,62 | 45,3 | 90,5 | 181,0 |
| **5** | 0,397 | 0,793 | 1,59 | 3,17 | 6,35 | 12,70 | 25,39 | 50,8 | 102,0 | 203,0 |
| **6** | 0,445 | 0,891 | 1,78 | 3,56 | 7,13 | 14,30 | 28,50 | 57 | 114,0 | 228,0 |

* (Anonim 1993 Photonics Design and Applications Handbook, değerler çizgiçifti/mm cinsindendir).

Ayırma gücü çizelgesinin incelenmesinde; örneğin 5'inci Grup 4'üncü eleman; 45,3 çizgi çifti /mm'ye denk gelmektedir, yani 1 mm'ye 45,3 çizgi çifti düştüğüne göre

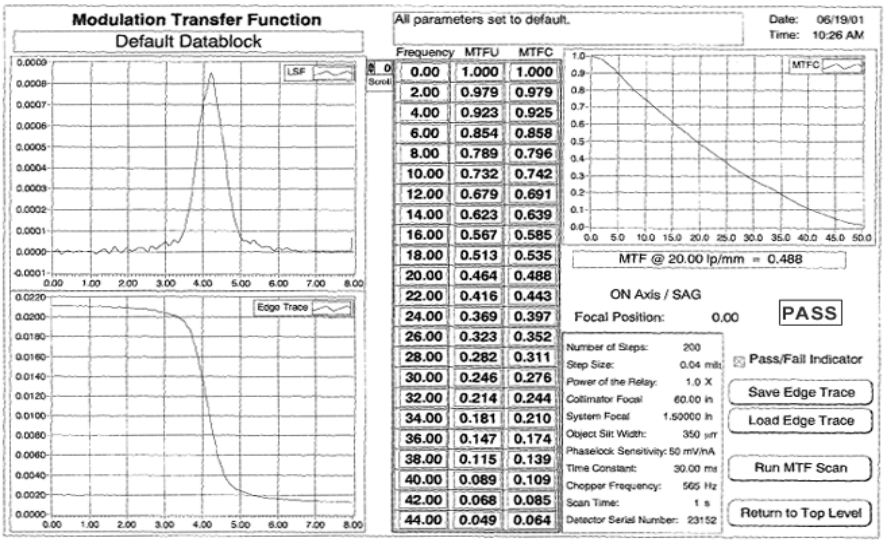
1 çizgi çiftinin kalınlığı = (çizgi kalınlığı=1mm) / (çizgiçifti sayısı =45,3)

1 çizgi çifti kalınlığı = 0,022075 mm. 1 çizgi çifti kalınlığı = 22 mikro metre.

1 çizgi kalınlığı = 11 mikron. 3 ncü nesil görüntü yoğunlaştırıcı tüp ile netlik ayarı yaptıktan sonra 11 mikron boşluğu olan iki 11 mikron kalınlığında çizginin ayırt edilebileceği görülmektedir. MTF, sistem performansını doğrudan ölçmesi ve sonucu nicel olarak göstermesi sebebiyle optik performans ölçümlerinde çok yaygın kabul görmüş bir kriterdir. Sistem MTF değeri, uygun bir mercek tasarım programı ile önceden tahmin edilebilir. Sistem MTF değerini ölçmek için, yüksek düzeyde optik bilgi sahibi olması gerekmediğinden MTF ölçümü operatöre bağlı değildir (Holst 1995 ve Wolfe 1996).

## 2.5 Gerçek Bir Sistemin MTF Çıktısı

İncelenmekte olan sistemin özelliğine bağlı olarak MTF ölçümü için özel düzenekler yapılarak sonuçlar alınmaktadır (Biberman 2000). Şekil 2.17'de bir gerçek sistem MTF çıktısı görülmektedir.




Şekil 2.17 Örnek bir gerçek sistemin MTF çıktısı (Anonim 2001)

## 2.6 MTF'in Analizinde Dikkat Edilecek Hususlar

MTF'i 1000 çizgi çifti/mm ayırma gücünde olan fotoğraf merceğinin mevcut olmadığı. MTF grafiğinde Y ekseni genliği, X ekseni uzaysal frekansı gösterdiğinden; görüntünün X ekseni boyunca ilerleyince uzaysal frekansın artmakta olduğu ve bunun görüntünün detayını gösterdiği bilinmelidir. Bir görüntünün en net noktası optik sistemin en bozulmasız halini ifade eden odak noktasıdır. Odak noktasından kenarlara gidildikçe MTF'de de X ekseninde sağa doğru gidilmekte, netlik azalmaya başlamaktadır. Y eksenindeki yüksek genlik oranı (% cinsinden), kontrast seviyesinin daha yüksek olduğunu gösterir; okuma sınırı genel olarak beyaz zemin üzerinde % 20 kontrasta siyah nesne görüntüsüdür; kontrast % 20'nin altına düştüğünde ayırma güçlüğü başlamaktadır. Bu sebeple askeri standartlarda (MIL-I-49453 Image Intensifier Assembly 18 mm Microchannel Wafer MX-10130 Military Specification vb.) MTF'in % 20'nin altına düştüğü uzaysal frekans değeri, eşik değer olarak alınır ve kıyaslanan GGC'ler en çok bu değer referans alınarak kıyaslanır. (Örneğin; 2. nesil GGC'de % 20 kontrast değerine 15 çizgiçifti/mm'de ulaşılırken, 3. nesil GGC'de bu değere 38 çizgiçifti/mm'de ulaşılmaktadır, bu nedenle 3. nesil GGC ayırma gücü açısından 2. nesil GGC'ye göre daha üstündür. Bu üstünlük Biberman'da (2000) da yer alan ve ABD'li askeri personelce dünyanın üç ayrı bölgesinde 1988'de yapılan aylarca süren çok detaylı bir çalışma ile de gösterilmektedir (Leslie 1988).

Görsel nesnelerde kritik uzaysal frekans; 10 lp/mm, 20 lp/mm ve 40 lp/mm dir. En önemli frekans 10 lp/mm'de toplam görüntü bilgisinin % 57' si ikinci önemli frekans olan 20 lp/mm toplam bilginin % 29' unu kapsar; üçüncü önemli frekans 40 lp/mm ise toplam bilginin sadece % 14'ünü kapsamaktadır (Gül 2003).

## 2.7 Görüntü Yoğunlaştırıcı Cihazların MTF Yapısı

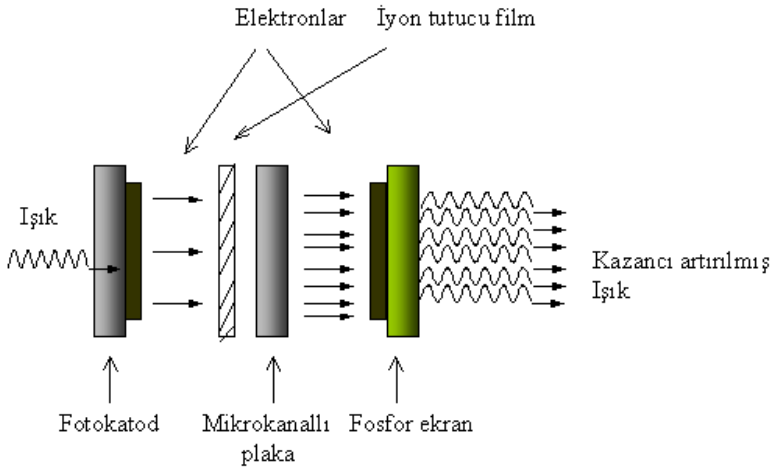
Görüntü yoğunlaştıcı tüpler, GGC'lerin foton algılama, fotonları elektronlara dönüştürme ve foto-elektronları yükselterek bir ekran vasıtasıyla tekrar fotonlara yani görüntüye dönüştürme görevini yerine getiren altbirimleri olup, MTF performanslarının gösterilmesinde değişik kaynaklarda birçok parametreye bağlı olarak ifade edilmektedirler (Biberman and Bender 2000). Bu MTF'ler genellikle üretim süreçlerine yönelik olup, gece görüş cihazının; parlak-karanlık nokta sınırı, sabit örüntü gürültüsü, vakum kaçağı ve çıkış parlaklık tekdüzeliği, parlak ışık koruması, faydalı katod çapı vb. alt parametrelerini de kapsayacak getir-götür analizlerine olanak sağlayacak bir MTF çalışması şeklinde yaygındır (Bosch 2000). Bunlar içerisinde özellikle kullanıcı personel için askeri standartlarda verilen ölçüm sonuçlarına yakın değerler veren ve karmaşık girdi içermeyen Eşitlik 2.9'da $MTF_{g.yoğ}$ olarak ifade edilen, MTF formulü tercih edilmiştir.

$$MTF_{g.yoğ.}(f_x) = e^{-2\pi^2\sigma^2_{IIT}f_x^2} \tag{2.9}$$

$f_x$ : Yatay eksen uzaysal frekans (çizgi çifti/mm)

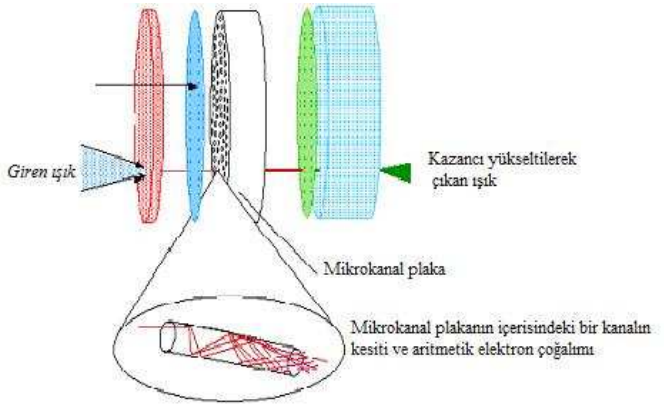
$\sigma_{IIT}$: görüntü yoğunlaştırıcı tüpün 1/e spot genişliğini (mm) göstermektedir.
Üretici firmalar GGC kataloglarında 1/e spot genişliğini genellikle vermemektedirler. Spot genişliği $\sigma_{IIT}$ üretilen tüpün duyarlılığına ve kullanılan malzemeye (mikrokanal genişliğine, fosfor ekran malzemesine ve kalınlığına, kazanç voltajına vb.) bağlıdır. İyi bir görüntü alınabilmesi için spot genişliğinin minimum olması beklenir (Biberman ve Bender 2000).

Görüntü yoğunlaştırıcı tüp, şekil 2.18'de sinyal akışının da gösterildiği şekilde esas olarak Fotokatod, Mikrokanallı Plaka, ve Fosfor ekrandan oluşur.




Şekil 2.18 Görüntü yoğunlaştırıcı tüpün çalışma prensibi

Şekil 2.18'de görüldüğü gibi fotokatod; optik görüntüye ulaşan düşük şiddetteki fotonları elektronlara dönüştürür. Fotokatod seçilen malzemeye bağlı olarak III. nesil cihazlarda 900 nm dalga boyuna yakın kızıl ötesi bölgede de hassasiyet gösterir. Mikrokanallı plaka ise işlev sırası olarak fotokatottan sonra gelir ve fotokatotda oluşan foto-elektronları yükseltir. Çok ince cam bir plaka görünümünde olup, milyonlarca (~2 milyon) ince kanaldan oluşmuştur. Mikrokanal plakada yükseltilen elektronların tekrar fotona dönüştürülmesi için ise bir ekran gerekmektedir. Bu ekran ise genellikle fosfor ekran olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.19'da mikrokanallı plakanın iç yapısı gösterilmektedir. Burada her bir kanal giren ışığın anlık seviyesine bağlı olarak oluşan foto-elektronları gometrik oranda artırarak çıkışta yükseltilmiş ışığı sağlayacak elektron demetini oluşturur.




Şekil 2.19 Mikrokanallı plaka işlevi

Çalışmalarda şekil 1.13.a'da ve 1.13.b'de sunulan iki cins ICCD gece görüş cihazı yapılmıştır; şekil 1.13.a'da 18 mm GEN III görüntü yoğunlaştırıcı tüplü gece görüş cihazı ile Pulnix CCD kamera kullanılmış, şekil 1.13.b'de ki ICCD de ise aynı görüntü yoğunlaştırıcı gece görüş cihazı kullanılmış, ancak CCD kamera değiştirilmiştir. 18 mm GEN III görüntü yoğunlaştırıcı gece görüş cihazı için MTF değerleri çizelge 2.2'de sunulmuştur;

Çizelge 2.2 MX-10160 18 mm GEN III GYT MTF değerleri *

| Uzaysal Frekans | MTF Değeri |
|---|---|
| 0 çizgi çifti/mm | % 100 |
| 2,5 çizgi çifti/mm | % 83 |
| 7,5 çizgi çifti/mm | % 60 |
| 15 çizgi çifti/mm | % 38 |
| 25 çizgi çifti/mm | % 20 |

* 06 Kasım 1989 tarihli "MIL-I-49453 Image Intensifier Assembly 18 mm Microchannel wafer MX-10130 Military Specification" adlı askeri şartnameden alınmıştır.

# 3. MATERYAL VE YÖNTEM

## 3.1 Giriş

Kuramsal Temeller Bölümü'nde gece görüş sistemlerinin esasları, dalga boyuna ve atmosfer geçirgenliğine bağlı sistem hassasiyetleri ile kullanım amaçları açıklanmış, uygulama alanlarına göre algılayıcı birimlerinin pasif veya aktif sistem olarak seçimi izah edilmiş, aynı zamanda sistem değerlendirme parametrelerinden MTF ve ayırma gücü ölçümü detaylı olarak incelenmiştir. Materyal ve Yöntem bölümünde, çalışmada kullanılan sistemlerin nasıl yapıldıkları ve özellikleri verilerek, şekil 2.2'deki modelleme üzerinden, çalışmada yapılan ölçümler ve aktif gece görüş sisteminin nasıl çalıştığı ve ICCD'nin IR kaynak seçiminde etkisi incelenecektir. Aynı zamanda ICCD'nin analitik MTF hesaplaması yapılarak, ki alt sistemlerden olan ve ICCD MTF'ni en fazla etkileyen GGC MTF'i için geliştirilen regülasyon katsayısı ile yeniden hesaplanacaktır, bulunan sonuç örnek sistem ile mukayese edilerek analitik sonucun yapılan regülasyon sonrasında örnek sistem değerlerine yaklaştığı gösterilecektir.

Burada daha önce yapılan karanlık ortam ölçüm çalışmalarında elde edilen; insan gözü, CCD, GGC ve ICCD'nin ayırma gücü mukayesesi sonuçları da (Gül ve Efe 2003) kullanılmıştır. Sistemin uygulama aşamasında GGC'ye uyumlu bir CCD fotoğraf makinesi araştırılmış ve Akita marka CCD fotoğraf makinesinin optik aksamının GGC'ne uyumlu olduğu tespitini takiben, CCD fotoğraf makinesi gece görüş cihazı ile uyumlandırılarak ICCD gerçeklenmiştir. Daha sonra uygun IR ışın kaynağı (ışıldak) üretilmiştir. Daha önce yapılan (Gül 2003) ve Şekil 1.13.b.'de gösterilen ICCD kamera ile aktif görüntüleme denemeleri yapılmış, fakat videonun da devreye girmesi, görüntü kayıplarını daha da arttırdığından kayıtlar esnasında problemlerle karşılaşılmıştır. Bu sebeple harici bir kayıt cihazı kullanılması yerine bir CCD fotoğraf makinesi kullanılması tercih edilmiş ve bu şekilde hiç ışık olmayan ortamda harici IR kaynak kullanılarak ICCD ile görüntü alınabilmiştir. Buna ilave olarak, aynı ölçüm koşulları altında IR aydınlatmalı CCD güvenlik kamerası ile harici IR ışın kaynaklı ICCD'nin hiç ışık olmayan ortamda alınan görüntüleri mukayese edilmiş, böylece analitik çalışmaları hakkında 2. bölümde bilgi verilen ICCD'nin analitik MTF'nin geliştirilmesi

ile ilgili olarak; CCD ile ICCD arasındaki temel farkı yaratan GGC'nin CCD'ye entegrasyonu açısından bir uyumsuzluk olmadığı ve ICCD'nin GGC sayesinde manuel olarak anahtarlanması ile görüntü alabildiği gösterilmiştir. Diğer taraftan; geliştirilen regülasyon katsayısının tutarlılığı, Boreman tarafından ifade edilen, sistemlerin uzaysal tepkilerinin bir Fourier Dönüşümü (FT) olduğundan hareketle, GGC'nin MTF'nin hem regülasyonsuz hem de regülasyonlu halinin Ters FT alınarak faz ve genlik olarak değişiklik olup olmadığı açısından incelenmiştir (Boreman 2001).

### 3.2 Ölçüm Ortamları

Başlangıçta ICCD kamera cihazı yapılmış ve karanlık test odasında kamera test edilmiştir. Daha sonra teknik özellikleri EK-4'de verilen pin diyotlu OD-669 GaAlAs IR led diyot kullanılarak IR kaynak gerçekleştirilmiş ve IR kaynak ile ICCD paralel eksenli hale getirilerek ölçümler yapılmış, ışık olmayan ortamda görüntüler alınmıştır.

IR kaynağın çalıştırılmadığı zamanlarda ışık olmayan koşullarda görüntü alınamadığı deneysel olarak gösterilmiştir. Dış çevre koşullarında çok düşük seviyeli ışık altında (yıldızlı gece vb.) görüntü alınabilmiş, ancak IR kaynak ile aydınlatma yapıldığında alınan görüntü üzerinde de IR kaynak etkisinin olumlu olduğu görülmüştür. CCD'nin yukarıda bahsedilen çok düşük seviyeli ışık koşulunda dahi görüntü almadığı, GGC'nin ise sadece hiç ışık olmayan ortamlarda görüntü almadığı; ancak çok düşük seviyeli ışık altında (GGC'nin algılama sınırı $2x10^{-6}$ftcd'nın üstünde) bulanık görüntü alabildiği görülmüştür.

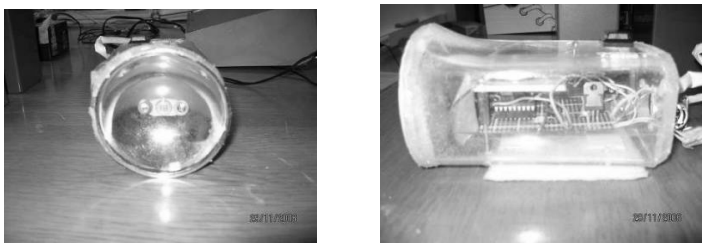
### 3.3 Hedefler

ICCD'nin yapılması esnasında hedef olarak USAF 1951 standart ABD üçlü bar hedefi seçilmiş, daha sonra IR ışın kaynağının aydınlatmasının üç boyutlu hedefteki farkını da görebilmek için değişik hedefler (oyuncak bebek, masa saati vb.) kullanılmıştır. ICCD ile IR ledli CCD kameranın ışık olmayan ortam ölçümlerinde aktif algılama farkını tespit amacıyla yapılan ölçümlerde damalı siyah-beyaz tahta hedef ile retro-reflektör özellikli bir malzeme kullanılmıştır. Ayrıca dış ortamda ağaç ve araç vb. hedefler üzerinde de görüntü çalışması yapılmıştır.

## 3.4 Araştırmalarda Kullanılan ve Yapılan Cihazlar

### IR kaynak

Tez çalışması için seçilen IR led; 9 pin diyotlu OD-669 GaAlAs IR led olup, yapılan IR kaynak şekil 3.1'de, özellikleri çizel 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 IR ışın kaynağının önden ve yandan görünüşü

Çizelge 3.1 IR ışın kaynağının özellikleri

| Parametre | Değer |
|---|---|
| IR kaynağın dalgaboyu | 880 nm ± 40 nm |
| IR kaynağın çıkış gücü (Diyot sayısı) | ortalama 190 mW (9 adet) |

### ICCD Kamera

Doktora çalışmasının başlangıcında (Gül 2003)'de yapılan şekil 3.2.a'da gösterilen TM-6 pulnix CCD'li ICCD ile şekil 3.3'de gösterilen kayıt cihazı kullanılarak görüntü kaydedilmeye çalışılmış, ancak başarılı bir sonuç alınamamıştır. Daha sonra şekil 3.2.b.'de gürülen ICCD modeli üzerine çalışılmış ve videonun devreden çıkması ile başarılı sonuç elde edilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.2 Çalışmada kullanılan cihazlar a. TM-6 CCD modeli ile gerçeklenen ICCD, b. Akita DC-4380 CCD ile yapılan ICCD görülmektedir.




(a) (b)

Şekil 3.3 ICCD çalışmasında kullanılan kayıt cihazı a. Sony TM-6 video kayıt cihazı , b. Video muhteviyatı

**Aktif görüntüleme cihazının çalışması**

Aktif görüntüleme sisteminin üzerinde, IR kaynağın güç kaynağını ve ICCD gece görüş cihazını anahtarlamalı olarak çalıştırmak ve kontrol etmek üzere iki tane basıp çekmeli güç kontrol anahtarı mevcuttur. ICCD'yi oluşturan CCD fotoğraf makinesinin üzerinde ayrıca ayar düğmeleri bulunmaktadır. IR kaynağı sürmek için ve gerçeklenen ICCD'nin gece görüş cihazının CCD ile uyumlu çalışabilmesi amacıyla 3. Bölümde açıklandığı şekilde iki adet güç kartı yapılmıştır. Gece görüş cihazının frekans üreteci 555 entegresi kullanılarak yapılmış, ışıldak için gereken kare dalga üreteci ise PIC entegresi kullanılarak ve çıkışında 2N3055 güç transistörü kullanılarak yapılmıştır.

Aktif görüntüleme sisteminde gece görüş cihazı için 3 volt pil, CCD kamera için 3 volt pil olmak üzere 4 adet AA tipinde 1.5 V'luk pil kullanılmakta, ayrıca IR ışıldak için 24 voltluk şarjlı batarya (NiCd) kullanılmaktadır. Cihazla çalışmaya başlarken önce CCD kamera çalıştılararak ayarlanır (flaşsız manzara modu) daha sonra gece görüş cihazı açma kapama anahtarı açılır. Böylece ICCD kamera algılamaya hazır hale getirilir. Yapılan ICCD gece koşullarında 20 mlüx seviyesine kadar IR kaynağına ihtiyaç duymadan görüntü kaydedebilmektedir. Ancak daha düşük seviyelerdeki ışık altında veya hiç ışık olmayan koşullarda ICCD kameranın görüntüsü olmamaktadır. Burada da GGC'den CCD'ye geçiş ve LCD ekrana geçişin getirdiği zayıflatmanın etkisi görülmektedir. Bu durumda IR kaynak düğmesine basmak suretiyle ışın kaynağı çalıştırılarak eş zamanlı olarak CCD kameranın kayıt düğmesine basıldığında IR ışın ile aydınlatılmış hedefin görüntüsü CCD kameranın hafızasına kaydedilmektedir.

Bu şekildeki çok düşük ışık koşulları altında çıplak gözle veya CCD kamera ile hiçbir şey görülememektedir. Gece görüş cihazları ile bakıldığında ise ışıma seviyesine bağlı olarak ortam ya hiç görülmemekte ya da görüntü çok bozuk olmaktadır. Aktif görüntülemede ise dışarıdan bakan insan için çıplak göz ile ortamın aydınlatıldığı anlaşılamamaktadır[7].

### 3.5 Aktif Görüntüleme Sisteminin Parçaları

Aktif görüntüleme sisteminin şekil 2.2'deki gösterilen esaslarda uygulanabilmesi için gereken bir adet ICCD kamera; bir adet ışın kaynağı ve uygun hedefler ölçümler öncesinde gerçeklenmiş, ayrıca ICCD kamera ve IR kaynağın birbirine uyumluluğu test edilmiştir. ICCD kamera; bir adet GGC, uygun bir adaptör ve bir adet CCD kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CCD kameranın hafıza kayıtlarının bilgisayar ortamına aktarılması gerektiğinde CCD kameranın çıkartılabilmesi amacıyla ICCD'nin kutusunun CCD tarafı özel bir şekilde yapılmıştır. IR kaynağın beslemesinde kullanılan 24 V NiCd batarya haricindeki diğer malzemenin tamamı tek bir kutuya yerleştirilebilmiştir. Şekil 3.4.a'da IR esaslı aktif görüntüleme elemanları şekil 3.4.b'de ise kullanıma hazır hali görülmektedir.



(a)

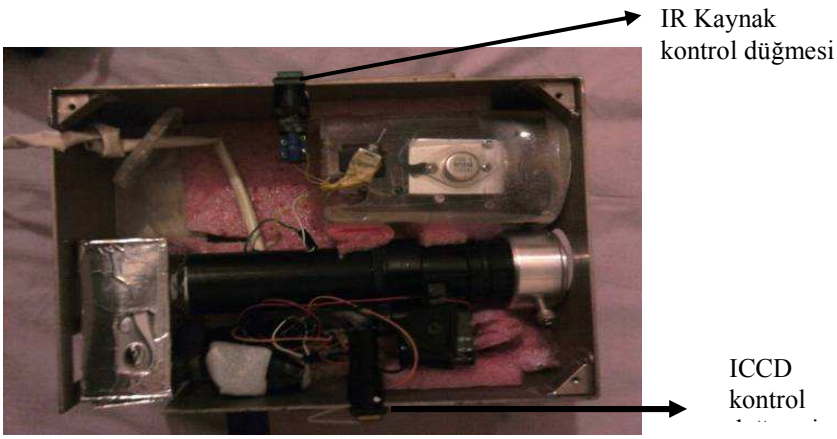


(b)

Şekil 3.4 IR esaslı aktif görüntüleme elemanları, a. en üstte kutu, aşağıda soldan sağa ICCD, IR kaynağı ve 24 V bataryası, b. IR esaslı aktif görüntüleme cihazının kullanıma hazır hali

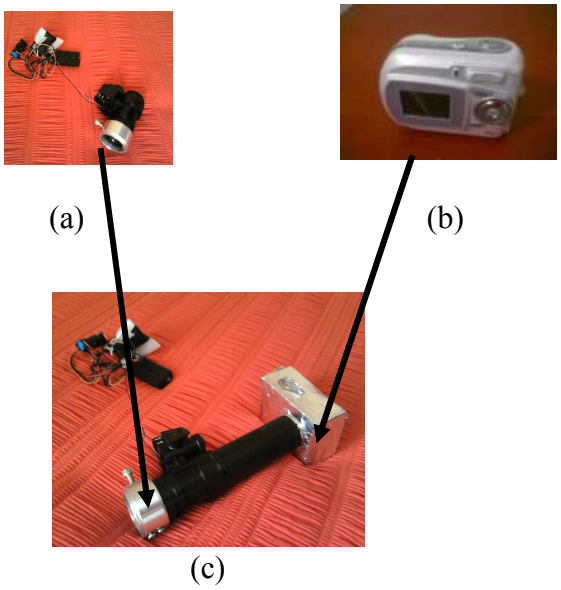
[7] Ancak geniş spektrumlu IR algılama sistemleri ile ortamda ışıma olduğunu ikaz eden bir sistem tesis ederek bir aydınlatıcıya maruz kalındığı anlaşılabilir

IR kaynak prototipinde yanlara doğru şaçılma olduğu tespit edilmiş, bu sebeple IR kaynağın etkisinin arttırılması amacıyla 7 cm çapında yansıtıcı kullanılarak yanlara saçılan ışımanın da hedefe doğru odaklanması sağlanmıştır.




Şekil 3.5 IR kaynak esaslı aktif görüntüleme sisteminin üstten görünüşü.

Şekil 3.5'de üst tarafta IR kaynağı kontrol düğmesi, alt tarafta ise ICCD'nin sensör girişi olan ve kare dalgalı üreteçli besleme kartlı gece görüş cihazı besleme kontrol düğmesi görülmektedir. ICCD'nin alt birimleri: ICCD kameranın yapımında kullanılan; bir adet GGC, uygun bir adaptör ve bir adet CCD kameradan oluşmaktadır. Gerçeklenen ICCD şekil 3.6'da görülmektedir.



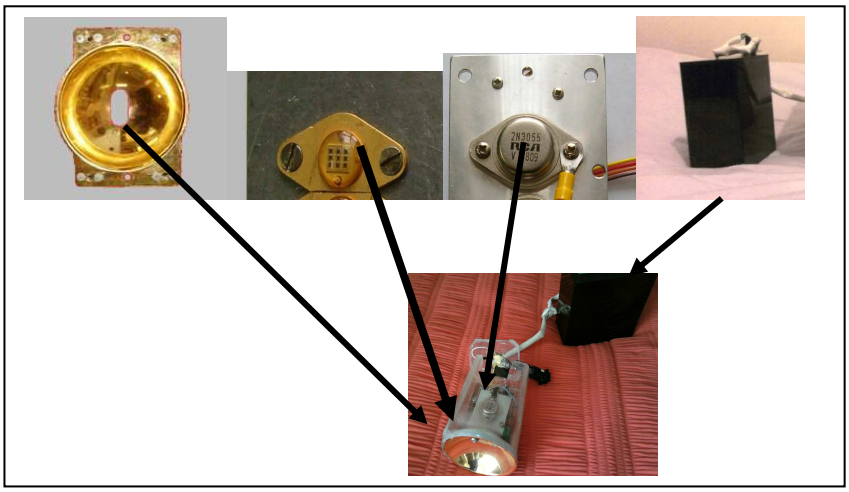

Şekil 3.6 ICCD'yi oluşturan a. Kare dalga beslemeli Monoküler gece görüş cihazı, b. Akita CCD fotoğraf makinesi, c. Gerçeklenen ICCD görülmektedir

ICCD ve IR kaynak gerçekleştirilmesi sürecinde GGC güç besleme ile ilgili elde edilen tecrübeler aşağıda açıklanmıştır; şekil 1.13.b'de görülen ve standart (2x 1.5 V'luk) 3 V pil ile beslemeli GGC ile yapılan ölçümlerde; GGC'nin besleme-kontrol devresinin sabit bir besleme kaynağı ile çalıştırılmasının GGC'deki foto-elektron dönüşümü ve mikrokanallı plakanın yüksek kazancı dolayısı ile CCD'yi doyuma götürdüğü tespit edildiğinden; teorik inceleme ve literatür araştırmasında ICCD için kullanılan GGC'nin anahtarlama özelliğinden faydanılarak bu teknik problemin aşılabileceği görülmüş (Moran 1997, Biberman 2000) ve EK-3'de devresi verilen 5 Khz frekanslı besleme devresi yapılarak GGC'ye entegre edilmiştir. Normal gece görüş faaliyetleri için kullanılan standart GGC'de bu 5 Khz'lik anahtarlama devresine ihtiyaç duyulmamaktadır. Şekil 1.13.b'de görülen ICCD'nin gece görüş cihazının açma kapama düğmesi sadece besleme kontrolünü yapmaktadır. Aynı ICCD ile doktora çalışmalarının başlarında yapılan denemelerde;

i. Aktif görüntüleme uygulamasında ortamdaki ışınım aniden arttığında, besleme gerilimi DC olarak verildiğinde ICCD'nin kısa sürede doyuma gittiği,

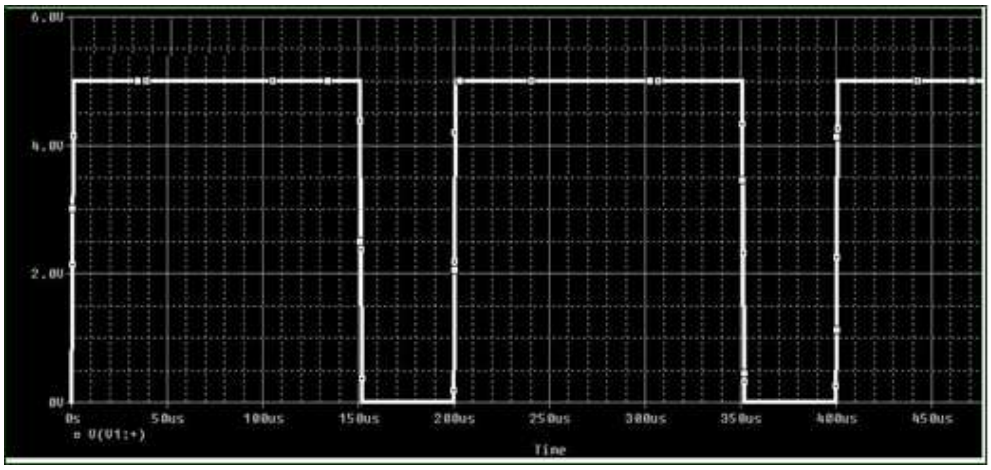
ii. Bir kaç görüntü alındıktan sonra tekrar görüntü almak için gece görüş cihazının açılıp kapatılması gerektiği,

iii. Ayrıca video kaydı ihtiyacı sebebiyle ortaya çıkan görüntü kayıpları tespit edildiğinden, (Gül 2003) çalışmalarında yapılan ICCD, doktora çalışmalarında kullanılamamıştır. Aktif görüntüleme sisteminin ikinci önemli elemanı IR ışın kaynağının alt birimleri şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7 Aktif görüntüleme sisteminin IR kaynağını oluşturan elemanlar görülmektedir.

Yapılan IR kaynak Ek 4'de verilen devre şemasına göre gerçeklenmiştir. Yapılan ölçümlerde IR frekans kararlılığının performans kararlılığını etkilediği görüldüğünden, performans kararlılığını sağlamak için IR ledi süren devre PIC 16F84 entegresi ile gerçekleştirilmiştir. IR kaynağı süren devrenin çıkış sinyali şekil 3.8'de görülmektedir.




Şekil 3.8: IR ışın kaynağı çalışma frekans bilgileri

Teknik bilgileri Ek 5'de verilen OD-669 IR diyotun besleme akımının yeterli olması için sürücü devrenin çıkış sinyalinin kullanım oranı (*duty cycle)* % 75 olarak ayarlanmıştır. 200 mikro sn'lik frekans aralığının 3/4 oranında 24 V'luk kaynak ile IR ledler beslenmektedir.

### 3.6 ICCD'nin MTF Analizi

Bu bölümde ICCD'nin analitik olarak MTF analizi yapılarak; ICCD'yi oluşturan başlıca elemanlar olan; GGC ve CCD'nin, tüm sistemin birleşik etkisini gösteren $MTF_{sis}$'ne olan MTF katkısı incelenecektir. Ayrıca Eşitlik 2.9'da verilen MTF formülünün ölçüm değerlerine uyumlu olabilmesi amacıyla geliştirilen regülasyonlu GGC MTF'i, $MTF_{g.yoğ}$ sayesinde ICCD'nin MTF'inin de iyileştirildiği (Gül ve Efe 2010) ve askeri şartnamelerde belirtilen gece görüş cihazı performans ölçütü olan ölçülen MTF değerlerine ne kadar yaklaşıldığı hakkında da bilgi verilecektir. Şekil 1.12'de temel yapı gösterimi verilen ICCD'nin MTF analizi ile ilgili geliştirilen regülasyon katsayısı hakkında yapılan yayım Ek 6'da verilmiştir. ICCD'nin MTF'inin ölçümü ve elde edilen

verilerin, teorik veriler ile mukayese edilmesinde henüz yeterince yayım ve bilgi olmadığı, ICCD MTF'ini bilgisayarlı sayısal bir sistem ile deneysel olarak tespit etmeye çalışan Wang ve arkadaşları tarafından da ifade edilmektedir (Wang et al. 2006). Diğer taraftan; ICCD'nin MTF analizinde; alt sistemlerinin tespit edilerek bu alt sistem MTF değerlerinin birbiriyle çarpılması suretiyle, bütün sistem MTF'inin bulunmasına ilişkin genel ifade konusunda yeterince kaynak bulunduğu hakkında yaygın ortak fikir mevcuttur (Holst 1996, Biberman 2000 ve Boreman 2001). Benzer olarak bu çalışmada yapılan analitik inceleme sırasında, ICCD'nin MTF'ni gösteren $MTF_{sis}$ ; en baskın MTF olan $MTF_{g.yoğ}$ ile sistemi oluşturan optik grubu, dedektör grubu ve elektronik sinyal zinciri ile gösterge elemanlarına ait ve sırasıyla $MTF_{optik}$, $MTF_{dedektör}$, $MTF_{sin\text{-}zin}$, $MTF_{gösterge}$ olarak ifade edilen uygun MTF değerlerinin çarpımı ile elde edilmektedir.
Bu durum Eşitlik 3.1 ile ifade edilmektedir.

$$MTF_{sis}=MTF_{optik}MTF_{g.yoğ}MTF_{dedektör}MTF_{sin.\text{-}zinciri}MTF_{gösterge} \quad (3.1)$$

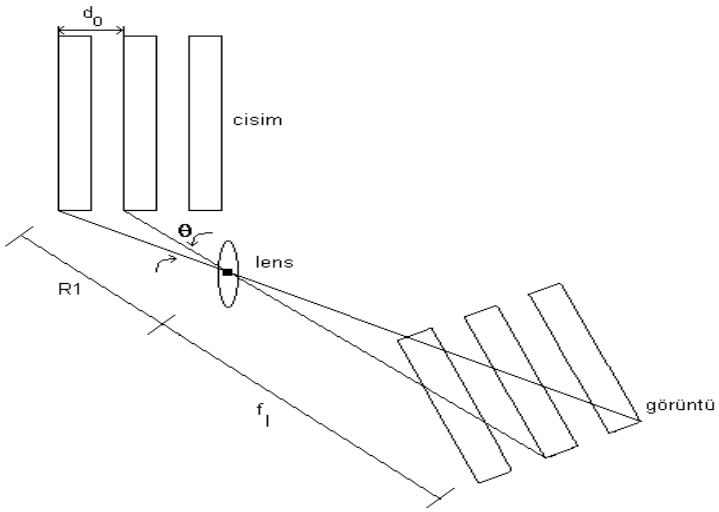
ICCD'nin sistem alt MTF'lerini ayrı ayrı inceleyecek olursak;

**$MTF_{optik}$:** Gerçekleştirilen ICCD'nin optik olarak giriş penceresinin MTF değeri, ışık toplama merceğinin açıklık çapına ve odak uzaklığına bağlı olarak ifade edilmektedir (Howe 2003). Diğer veriler optik sistemin genel yapısından gelen parametrik verilerdir. Uzaysal frekans ve odak uzaklık bağlantısı şekil 3.9'da görülen bir optik sistemin MTF'in nasıl çıkarıldığı özet olarak Eşitlik 3.2- Eşitlik 3.8'de verilmektedir.

$$MTF_{optik}=\frac{2}{\pi}\left[\cos^{-1}\left(\frac{f_i}{f_{oc}}\right)-\frac{f_i}{f_{oc}}\sqrt{1-\left(\frac{f_i}{f_{oc}}\right)^2}\right] \qquad f_i<f_{oc}$$
$$MTF_{optik}=0 \qquad \text{başka yerlerde} \quad (3.2)$$

Burada; $f_i$= Sanal uzaysal frekans çizgi çifti/mm veya devir/mm
$f_{oc}$= Optik kesim frekansı devir/mm olmaktadır.

$$f_i = \frac{f_{oc}}{fl} \qquad \text{çizgiçifti/mm veya devir/mm} \tag{3.3}$$




Şekil 3.9 Uzaysal frekans ve uzaklık bağlantısı

*fl*= Odak Uzunluğu m cinsinden.

$$\mathrm{f_{oc}} = \frac{1}{1000}\left(\frac{\mathrm{R_1}}{\mathrm{d_0}}\right) \text{ devir/mrad} \tag{3.4}$$

$\mathrm{f_{oc}}$: Cismin yatay eksen uzaysal frekansı devir/mrad.

$d_o$ : Bir çevrimin uzaysal derecesi (1 bar ve 1 boşluk)

$R_1$ : Sanal sistem giriş açıklığından hedefe uzaklık (metre)

$$\mathrm{f_{oc}} = \frac{\mathrm{D_0}}{\lambda \cdot \mathrm{fl}} = \frac{1}{\mathrm{F} \cdot \lambda} \quad \text{devir/mrad} \tag{3.5}$$

$D_0$= Açıklık çapı (mm) $F$: F-sayısı: $\mathrm{F\#} = \dfrac{fl}{D_0}$ (3.6)

$\mathrm{MTF_{optik}}$ , $\mathrm{MTF(f_x)}$ ve $\mathrm{MTF(f_y)}$'nin aynı olduğu doğrusal yaklaşımı uygulanarak Eşitlik 3.2 basitleştirilebilir ve Eşitlik 3.7 elde edilir.

$$MTF_{optik}=1-\frac{4}{\pi}\left(\frac{f_i \cdot \lambda}{D_0}\right) \quad (3.7)$$

Burada; $D_0$= Açıklık çapı (mm), $\lambda$ :dalga boyu (μ)

Kullanılan giriş optiğinin $MTF_{optik}$ değeri; $D_0$=25,4 mm ve $\lambda_{ort} = 0{,}55\mu m$ değerleri için hesaplandığında;

$f_i$: uzaysal frekans (0, 2,5, 5, 7,5 10, 15, 20, 25, çizgi çifti/mm ) olmak üzere;

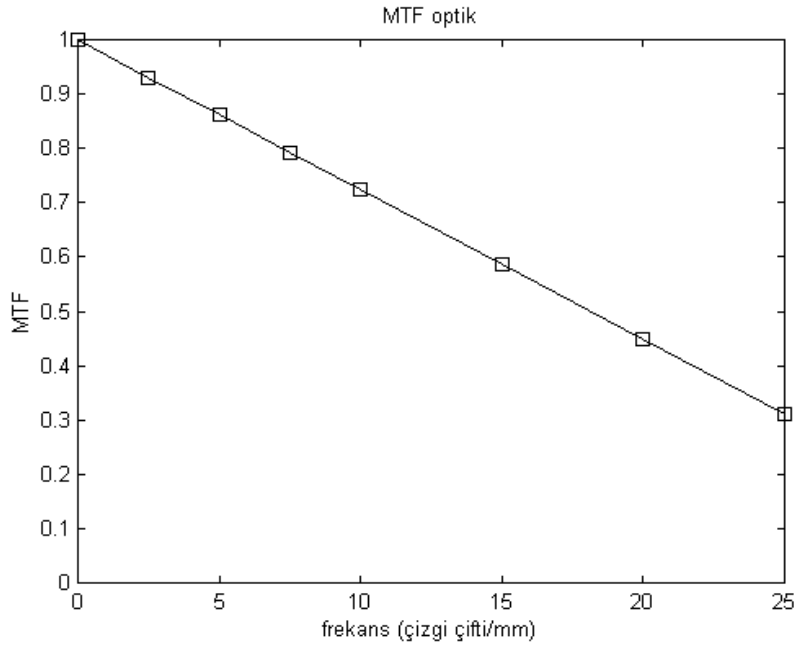
$$MTF_{optik} = \left[1 - f_x / 36{,}27\right] \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.8'den Çizelge 3.2'de verilen MTF değerleri hesaplanır.

Çizelge 3.2 Optik MTF değerleri.

| $f_x$ (lp/mm) | 0 | 2,5 | 5 | 7,5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $MTF_{optik}$ | 1.0000 | 0.9311 | 0.8621 | 0.7932 | 0.7243 | 0.5864 | 0.4486 | 0.3107 |

Şekil 3.10 Çizelge 3.2.'de yer alan $MTF_{optik}$ değerlerinin çizimini göstermektedir. Şekil 3.10'dan görüldüğü gibi, analiz sınırı olarak belirlenen 25 çizgiçifti/mm frekansı açısından, $MTF_{optik}$ değeri % 30'un üstündedir, yani $MTF_{optik}$ , sistemin MTF'ni etkilemekle birlikte kesim frekansını tek başına belirleyici bir etken değildir. Şekil 3.10'un incelenmesinde; aslında GGC cihazının tasarım aşamasında sistemin pratik ve küçük olması ile performansının daha da yüksek olması arasında bir tercih yapıldığı görülmektedir. Bu ise Eşitlik 3.7'den kolayca anlaşılabilmektedir. Burada uzaysal frekans değeri $f_i$ değişken değer olduğundan, sabit değerler olan λ ve $D_0$ incelenecek olursa; λ'nın insan gözüne etki edecek görünür bölgeyi gösterdiği görüleceğinden bu değerin yükseltilmesi anlamlı gözükmemektedir. Oysa, giriş optiğinin açıklık çapı $D_0$ 25,4 mm, yani 1 inç yerine 1,5 inç (38,1 mm) seçilmiş olsaydı; GGC biraz daha büyük olacak; ancak analiz sınırı olarak belirlenen 25 çizgiçifti/mm frekansı açısından, merceğin $MTF_{optik}$ değeri % 54'ün üstünde olacaktır. Buradan görüleceği üzere optik sistem tasarımındaki küçük bir değişiklik ile optik kesim frekansında % 70 civarında iyileştirme yapmak mümkün olabilmektedir. Bu yeni koşul gerçekleşmiş olsaydı, Şekil 3.10'daki 25 çizgiçifti/mm'ye denk gelen değer; 0,544 olmuş olurdu.




Şekil 3.10 MTF Optik çizelge 3.1 değerlerine göre çizilmiştir

**MTF gece görüş cihazı (görüntü yoğunlaştırıcı tüp):** Çalışmada kullanılan GGC içerisinde bir benzeri şekil 3.11'de gösterilen Litton ürünü MX-10160 18 mm GEN III görüntü yoğunlaştırıcı tüp kullanılmaktadır. ICCD'nin MTF'nin bulunmasında optik aksamdan sonra gelen gece görüş cihazının MTF'i, aslında görüntü yoğunlaştırıcı tüpün de MTF'ni göstermektedir. GGC'nin MTF'i için elde edilen teorik ve ölçüm sonuçlarını uzaysal frekans ve spot genişliğine bağlı olarak karşılaştırabiliriz. Eşitliği 2.9'da verilen GGC'nin MTF formülü; matematiksel olarak yaklaşık bir Gaussian ifadesi olduğundan ölçüm sonuçlarına ulaşmak için bir regülasyon fonksiyonu eklenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Eşitlik 2.9 ile verilen regülasyonsuz, orjinal $MTF_{g.yoğ}$ formülüne göre elde edilen veriler çizelge 3.3'de verilmektedir. Çizelge 3.3'deki hesaplama sonuçları ve çizelge 2.2'de, çalışmada kullanılan MX-10160 GGC için verilen $MTF_{g.yoğ}$ ölçüm sonuçlarına göre çizilen şekil 3.12'den görüleceği üzere; gerçek ölçüm sonuçları ile hesaplanan değerler mukayese edildiğinde; düşük frekanslarda ölçülen $MTF_{g.yoğ}$ 'e göre hesaplanan $MTF_{g.yoğ}$ değeri yüksek, yüksek frekanslarda ise hesaplanan $MTF_{g.yoğ}$ değerinin düşük olduğu görülmektedir. Böyle bir sonuç, sezgisel olarak geçiş frekansı civarında logaritmik iki parçalı bir regülasyonu çağrıştırmaktadır. Buna ilave olarak; spot genişliği 15 μm için ölçülen $MTF_{g.yoğ}$ değerinin, aynı spot genişliğinde ve 14,5 çizgiçifti/mm uzaysal frekans değeri için hesaplanan $MTF_{g.yoğ}$ değeri ile örtüştüğü de

şekil 3.12'de açıkca görülmektedir. Uzaysal frekansın tam sayı olması açısından geçiş frekansı olarak 15 çizgiçifti/mm seçilmiştir. Gerçek $MTF_{g.yoğ}$ değeri monotonik olduğundan, seçilecek regülasyonun tek katsayılı olması halinde geçiş frekansından önce (sonra) $MTF_{g.yoğ}$ değerinde iyileştirme yaparken, geçiş frekansından sonra (önce) uyumu kötüleştirecektir.

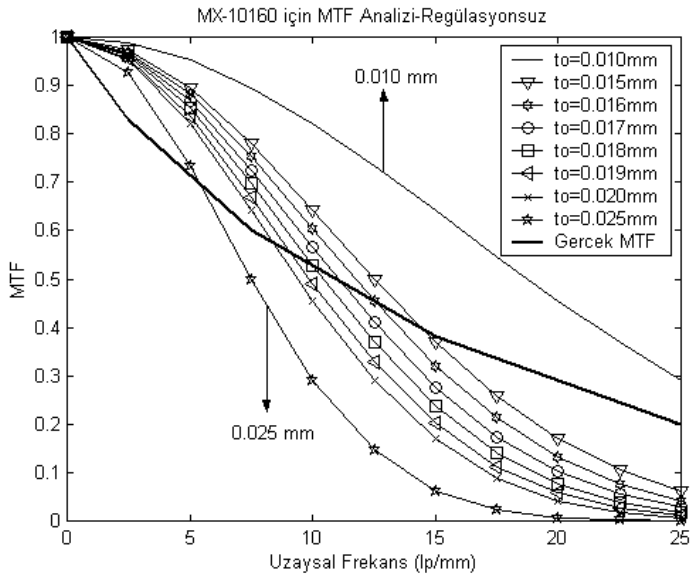


Şekil 3.11 Görüntü yoğunlaştırıcı tüp örneği

Çizelge 3.3 MX-10160 için MTF Analizi-Regülasyonsuz* (Eşitlik 2.9'a göre)

| **σ( μm )** | **10** | **15** | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** | **25** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **$f_x$=0** | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| **$f_x$=2,5** | 0.9877 | 0.9726 | 0.9689 | 0.9650 | 0.9608 | 0.9564 | 0.9518 | 0.9258 |
| **$f_x$=5** | 0.9518 | 0.8949 | 0.8813 | 0.8671 | 0.8522 | 0.8368 | 0.8209 | 0.7346 |
| **$f_x$=7,5** | 0.8949 | 0.7789 | 0.7526 | 0.7255 | 0.6979 | 0.6698 | 0.6414 | 0.4996 |
| **$f_x$=10** | 0.8209 | 0.6414 | 0.6033 | 0.5653 | 0.5275 | 0.4904 | 0.4540 | 0.2912 |
| **$f_x$=12,5** | 0.7346 | 0.4996 | 0.4540 | 0.4101 | 0.3681 | 0.3284 | 0.2912 | 0.1455 |
| **$f_x$=15** | 0.6414 | 0.3681 | 0.3208 | 0.2771 | 0.2372 | 0.2012 | 0.1692 | 0.0623 |
| **$f_x$=17,5** | 0.5463 | 0.2566 | 0.2128 | 0.1743 | 0.1411 | 0.1128 | 0.0891 | 0.0229 |
| **$f_x$=20** | 0.4540 | 0.1692 | 0.1325 | 0.1021 | 0.0774 | 0.0578 | 0.0425 | 0.0072 |
| **$f_x$=22,5** | 0.3681 | 0.1056 | 0.0774 | 0.0557 | 0.0393 | 0.0271 | 0.0184 | 0.0019 |
| **$f_x$=25** | 0.2912 | 0.0623 | 0.0425 | 0.0283 | 0.0184 | 0.0116 | 0.0072 | 0.0004 |

* $\sigma_{IIT}$ = 15 μm değeri fark hesaplarında kullanıldığı için gri olarak işaretlenmiştir.




Şekil 3.12 MTF gece görüş değerleri, Çizelge 3.3' e göre çizilmiştir

Eşitlik 2.9'dan elde edilen grafikler ile ölçülen verilerden Litton MX-10160'ın spot genişliği yaklaşık 15 μm bulunmaktadır. Çalışmalarda spot genişliği aralığı 10 μm'den 25 μm'ye kadar denenmiş ve elde edilen veriler analiz edilmiştir. Böylece uzaysal frekansa bağlı verilen ölçüm sonuçları ile Eşitlik 2.9 ile hesaplanan $MTF_{g.yoğ}$ ifadesi arasında ortak yanlar bulunmuş ve geçiş (cross over) uzaysal frekansı; $f_{co}$=15 çizgiçifti/mm olarak tespit edilmiştir. Burada uzaysal frekans üst sınırı 25 çizgiçifti/mm olarak alınmıştır ki; bu çalışma frekansı çizelge 2.1'de de verilen ayırma gücü kriterine göre Grup 4, eleman 5'i göstermektedir[8]. Burada analitik $MTF_{g.yoğ}$ formülünün düşük (yüksek) frekanslarda azalan (artan) $MTF_{g.yoğ}$ değerlerini vermesine ihtiyaç olduğu düşünülerek, Eşitlik 2.9' a ilave olarak geçiş frekansı $f_{co}$=15 çizgiçifti/mm referans alınarak bir regülasyon faktörü geliştirilmiştir. Geliştirilen eşitlik, Eşitlik 3.10'da verilmektedir (Ek 6).

Daha sonra Eşitlik 3.9 ile verilen regülasyon faktörü Eşitlik 2.9'a eklenerek OMNI-III GGC için regüle edilmiş analitik $MTF_{g.yoğ}$ elde edilmiştir.

[8] Zaten bu frekansa kadar olan analitik çalışma % 20'lik kontrast seviyesine olan tepkiyi de içermesi açısından çalışmanın uzaysal frekans adına yeterliliğini göstermektedir. Benzer analitik modellemede de bu frekans sınırı yeterli görülmektedir (Ientilucci 2000).

$$K(f_x)=\begin{cases}\pi\cdot f_x\cdot\ln\left(\dfrac{f_x}{f_{co}}\right) & f_x\le f_{co}\\ f_x\cdot\ln\left(\dfrac{f_x}{f_{co}}\right) & f_{co}<f_x<25\end{cases} \qquad (3.9)$$

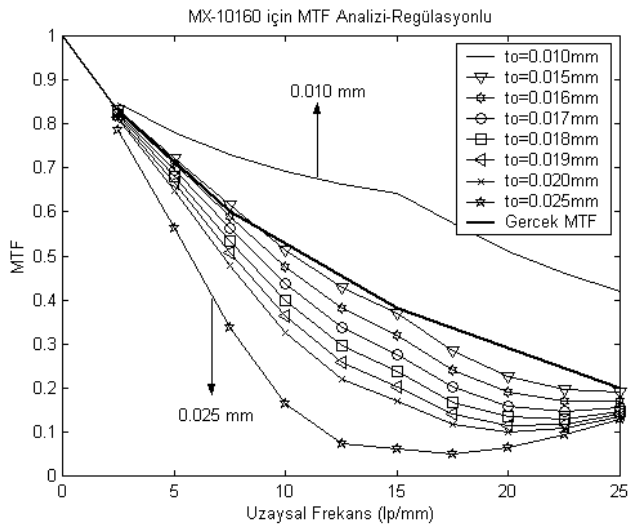
Sonuç olarak bulunan regülasyonlu $MTF_{g.yoğ}$ , Eşitlik 3.10'de verilmiş ve değişik spot değerleri için elde edilen veriler çizelge 3.4'de gösterilmiştir. Şekil 3.11'da gösterilen gerçek (ölçülen) $MTF_{g.yoğ}$ yerinde kaldığı halde üzerine Eşitlik 3.10'a, yani çizelge 3.4'deki değerlere göre çizilen $MTF_{g.yoğ}$ şekil 3.13'de görülmektedir.

$$MTF_{g.yoğ}(f_x)=\begin{cases}e^{-2\pi^2\sigma_{IIT}{}^2 f_x{}^2}+\pi.f_x\cdot\ln\left(\dfrac{f_x}{f_{co}}\right).0{,}01 & f_x\le f_{co}\\ e^{-2\pi^2\sigma_{IIT}{}^2 f_x{}^2}+f_x\cdot\ln\left(\dfrac{f_x}{f_{co}}\right).0{,}01 & f_{co}<f_x<25\end{cases} \qquad (3.10)$$

Çizelge 3.4 MX-10160 için MTF analizi regülasyonlu* (Eşitlik 3.10'e göre)

| **σ( μm )** | **10** | **15** | **16** | **17** | **18** | **19** | **20** | **25** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **$f_x$=0** | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| **$f_x$=2,5** | 0.8470 | 0.8319 | 0.8282 | 0.8242 | 0.8201 | 0.8157 | 0.8111 | 0.7851 |
| **$f_x$=5** | 0.7793 | 0.7223 | 0.7088 | 0.6945 | 0.6797 | 0.6643 | 0.6483 | 0.5620 |
| **$f_x$=7,5** | 0.7316 | 0.6156 | 0.5893 | 0.5622 | 0.5345 | 0.5064 | 0.4781 | 0.3363 |
| **$f_x$=10** | 0.6935 | 0.5140 | 0.4759 | 0.4379 | 0.4001 | 0.3630 | 0.3267 | 0.1638 |
| **$f_x$=12,5** | 0.6630 | 0.4280 | 0.3824 | 0.3385 | 0.2965 | 0.2568 | 0.2196 | 0.0739 |
| **$f_x$=15** | 0.6414 | 0.3681 | 0.3208 | 0.2771 | 0.2372 | 0.2012 | 0.1692 | 0.0623 |
| **$f_x$=17,5** | 0.5733 | 0.2836 | 0.2397 | 0.2013 | 0.1680 | 0.1398 | 0.1161 | 0.0498 |
| **$f_x$=20** | 0.5116 | 0.2268 | 0.1900 | 0.1596 | 0.1350 | 0.1154 | 0.1000 | 0.0647 |
| **$f_x$=22,5** | 0.4594 | 0.1968 | 0.1687 | 0.1469 | 0.1305 | 0.1184 | 0.1096 | 0.0932 |
| **$f_x$=25** | 0.4189 | 0.1900 | 0.1702 | 0.1560 | 0.1461 | 0.1393 | 0.1349 | 0.1282 |

* $\sigma_{IIT}$ = 15 μm değeri fark hesaplarında kullanıldığı için gri olarak işaretlenmiştir.

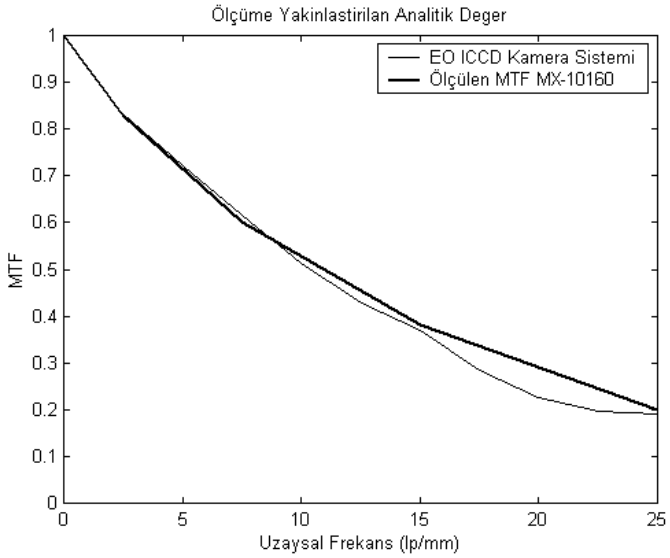



Şekil 3.13 Regülasyonlu MTF gece görüş değerleri, çizelge 3.4'e göre çizilmiştir

Çizelge 3.4'deki değerlerden, bu çalışmada kullanılan GGC için öngörülen spot genişliği $\sigma_{IIT}$ = 15 μm için hesaplanan sütun değerleri referans alınarak; ölçülen MTF değerleri ile mukayese edilmiş ve sonucu Çizelge 3.5'de verilmiştir. Çizelge 3.5'e göre yapılan incelemede; spot genişliği 15 μm olarak kabul edildiğinde, Eşitlik 3.10'a göre yapılan hesaplamanın analitik MTF formülünü iyileştirdiği ve ölçüm sonuçlarına çok yakın sonuçlar verdiği, analitik formülün hassasiyetini yükselttiği görülmüştür. Bu sonuçlar Eşitlik 3.10 kullanılarak elde edilen MTF değerinin Çizelge 3.5'deki farkı da gösterecek şekilde yeniden çizilmesi ile şekil 3.14'den açıkca görülmektedir

Çizelge 3.5 GYT için MTF değerleri ve farkı

| $f_x$ (çizgiçifti/mm) | 0 | 2,5 | 7,5 | 15 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|
| MTF (Ölçülen) | 1.0000 | 0.83 | 0.60 | 0.38 | 0.20 |
| MTF(2.9) | 1.0000 | 0.97 | 0.78 | 0.37 | 0.06 |
| MTF(3.11) | 1.0000 | 0.83 | 0.61 | 0.37 | 0.19 |
| Fark (Ölç.- 3.11) | 0 | 0 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |



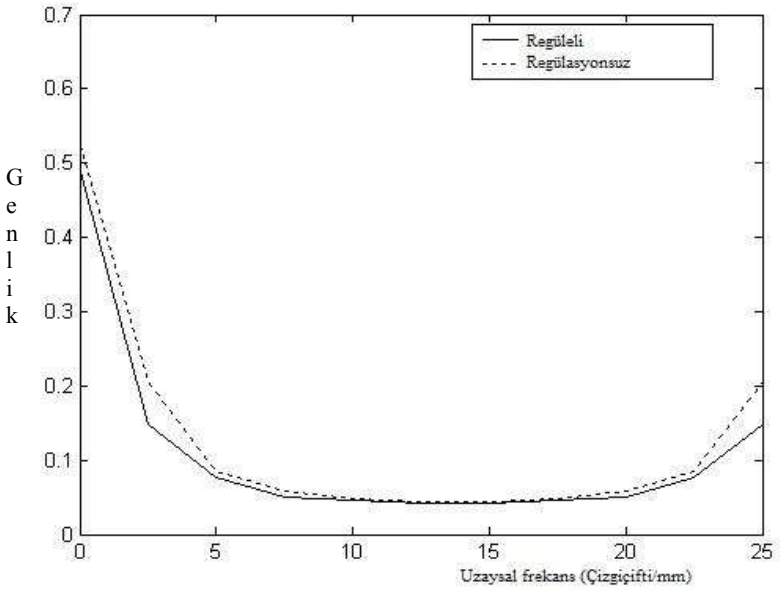

Şekil 3.14 Regülasyonlu MTF ve MX-10160'ın gerçek değerleri

Şekil 3.12 ile şekil 3.14 karşılaştırıldığında; şekil 14'de spot genişliği 15 μm için bulunan regüleli MTF'in değer olarak ölçülen MTF değerine hem şekilsel hem de numerik olarak çok yakın sonuç verdiği görülmektedir. Böylece en yaygın kullanılan analitik MTF formülasyonu için önerilen modifikasyon ile elde edilen analitik hassasiyet artışı, üreticilere üretimde öngördükleri kalite seviyesine yakın bir tasarım yapmalarında da yardımcı olacaktır. Bunun ise üretim maliyetlerini de ucuzlatan bir katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Buraya kadar olan değerlendirmelerden görüleceği üzere GGC'nin görüntü kalitesi, üretim esnasında doğrudan kontrolu çok mümkün olmasa da büyük oranda spot genişliğine bağlıdır; bu ise GYT'ü oluşturan en kritik eleman olan MCP'nin üretim açısından en hassas birim olduğunu göstermektedir. İşlevsel olarak işlem sırasını şekil 1.5'deki gece görüş cihazı ile görüntü aktarımını tekrar göz önüne getirdiğimizde; fotokatodu geçip elektron olarak MCP'ye giren bir foto-elektronun çapının küçüklüğü göz önünde bulundurulursa ($Re=2.817940285 \times 10^{-9}$ μm ) gelecekte MCP'lerdeki iyileştirmelerin devam edeceği, buna bağlı olarak GGC'nin ayırma gücünün de iyileştirileceğini ileri sürmek mümkündür. Yapılan çalışmalarda bulunan sonuçlarla; ölçülen hata oranının teorik olarak hesaplanan değere göre regülasyon sayesinde yüzde 20'lerden kabul edilebilir bir hata seviyesine kadar yüzde 3'lere azaldığı görülmektedir. Böylece GGC için geliştirilecek benzetim simülasyonlarında (Ientilucci 2000) kullanılabilecek MTF formülünün, sadece Gaussian bir formül değil, Gaussian + logaritmik bir regülasyon formülü ile ifade edilmesinin en

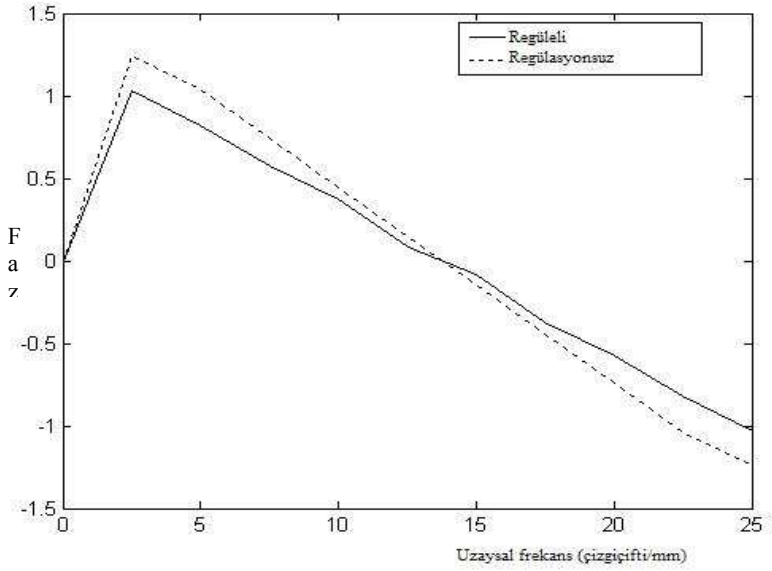
uygun durum olduğu önerilmiştir (Gül, Efe and Vincent 2008). Yapılan bu regülasyonun doğruluğu Boreman'a göre de FT sayılan MTF'in genlik ve faz olarak ters FT'sine bakılarak da kontrol edilebilir. Bu durumda şekil 3.15 ve şekil 3.16'dan da görüleceği üzere;

i. Genlik olarak; her iki fonksiyonun da hemen hemen aynı sonucu verdiği; 2.5-5 çizgiçifti/mm ve 22.5-25 çizgiçifti/mm frekans aralıkları için az da olsa bir farklılık görüldüğü; ancak genel olarak regüleli ve regülasyonsuz Ters FT'nin birbirine çok yakın fonksiyonlar olduğu,

ii. Faz olarak bakıldığında ise; iki MTF'in faz olarak ters FT'si arasında fark olduğu; yaklaşık 15 çizgiçifti/mm frekansı (geçiş frekansı) için şekil 3.9'dakine benzer olarak düşük frekanslarda regülasyonsuz MTF'in yüksek değer gösterdiği ve bunun ileri faz olarak grafiğe yansıdığı, diğer taraftan geçiş frekansından sonra regülasyon etkisinin ileri faz olarak görüldüğü ve toplam süre birlikte değerlendirildiğinde regüleli ve regülasyonsuz MTF'ler arasında bir faz dengelemesinin söz konusu olduğu ifade edilebilir.




Şekil 3.15 Regülasyonlu ve regülasyonsuz $MTF_{g.yoğ}$ için genlik Ters FT'ler




Şekil 3.16 Regülasyonlu ve regülasyonsuz $MTF_{g.yoğ}$ için faz Ters FT'ler

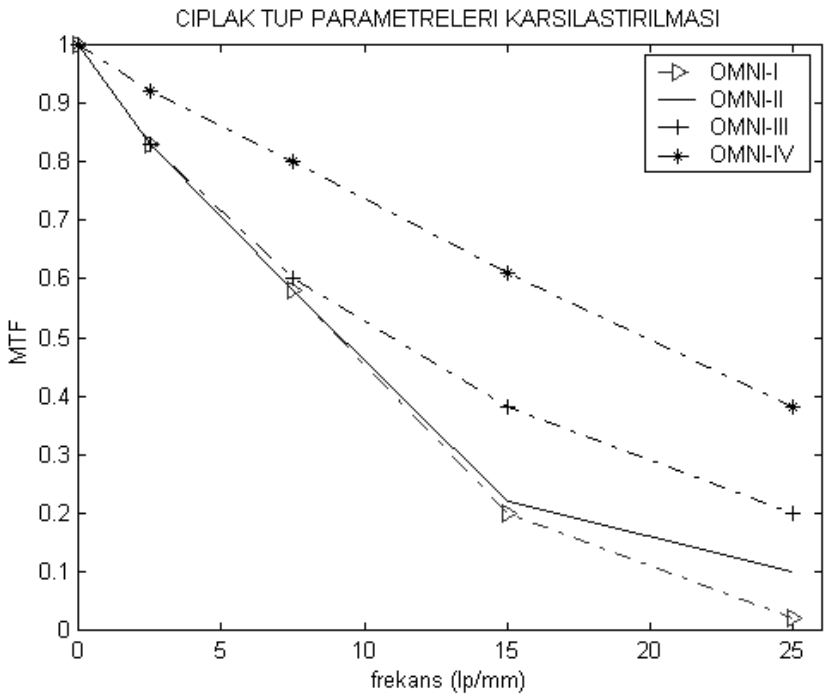
**1., 2. ve 4. Nesil GGC için MTF'lerin Regülasyonları**

Yukarıda 3. Nesil GGC için uyguladığımız MTF regülasyon geliştirmesini, günümüzde yaygın olarak kullanılan 4. Nesil (OMNI.IV) GGC için de geçerli olacağını göstermek açısında da ayrı bir çalışma yapılarak 4. Nesil GGC için bulunacak yeni regülasyon katsayıları ile bunun mümkün olduğu; yukarıda ortaya koyduğumuz Gaussian + logaritmik regülasyon formülünün diğer nesil GGC'ler için de uygulanabilir olduğu gösterilmektedir. Bu sebeple yine askeri standartlarda geçen çıplak tüp MTF değerlerini referans olarak alırsak; çizelge 3.6'yı elde ederiz.

Çizelge 3.6 1.-4. Nesil GYT için Ölçülen MTF'ler

| **frekans çizgiçifti/mm** | **1. Nesil OMNI.-I (%)** | **2. Nesil OMNI.-II (%)** | **3. Nesil OMNI.-III (%)** | **4. Nesil OMNI.IV (%)** |
|---|---|---|---|---|
| **0** | 100 | 100 | 100 | 100 |
| **2.5** | 83 | 83 | 83 | 92 |
| **7.5** | 58 | 58 | 60 | 80 |
| **15** | 20 | 20 | 38 | 61 |
| **25** | 3 | 10 | 20 | 38 |

Çizelge 3.6'ya yakından bakacak olursak; aslında ilk üç nesilden 1. ve 2. Nesilin MTF açısından (% 20 kontrast oranı çözünürlük sınırı olarak alınırsa) çok farklı bir konfigürasyon olarak gözükmediği, ancak GYT'ün ebatını küçültülmesi, ömrünü uzatacak diğer özellikler ve kesim frekansının biraz iyileştirilmesi 1. Nesilde kesim frekansında (25 çizgi çifti/mm için) MTF % 3 olurken, bu değerin 2. Nesilde % 10'a çıkmış olması temel fark olarak ortaya konabilir. GGC'nin MTF'i açısından kayıda değer ilerlemenin ise 3. ve 4. Nesil'de ortaya çıktığı görülmektedir. Burada öncelikle şekil 3.17'de çizelge 3.6'da derlenen ölçülen, gerçek MTF değerleri görülmektedir. Yukarıda da ifade ettiğimiz gibi nesiller arasındaki anlamlı fark 3. Nesile ve 4. Nesile geçişte görülmektedir.



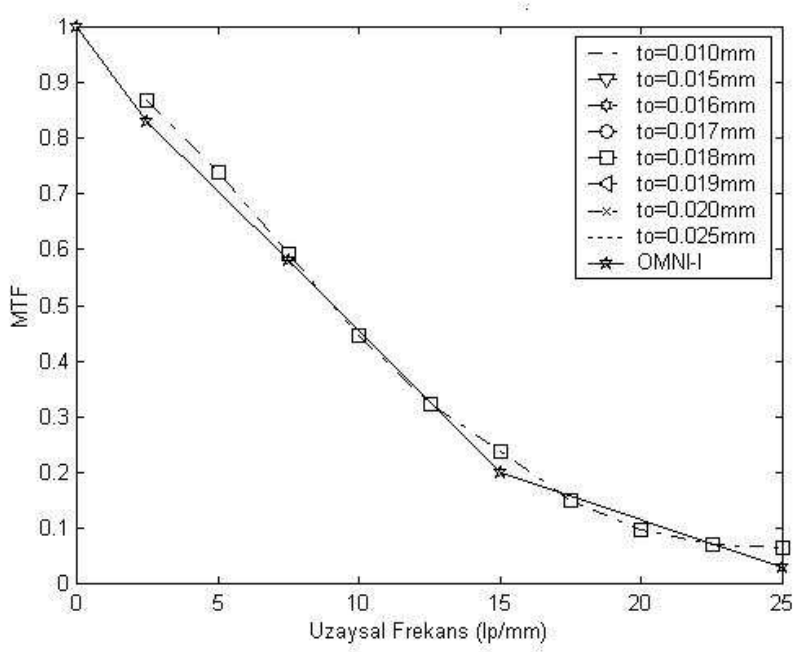

Şekil 3.17 Nesiller arasındaki MTF farklılığının gösterimi

**1. Nesil OMNI-I için MTF,**

Buradan hareketle, 1. Nesil için geliştireceğimiz regülasyon katsayısına $K_1$ dersek; 1. Nesil GGC için Eşitlik 3.11'deki MTF'i, Eşitlik 3.12'deki $K_1$ değerine bağlı olarak elde ederiz. Böylece 1. Nesil GGC için MTF değeri Eşitlik 3.12 yardımı ile şekil 3.18'deki gibi çizilebilir.

$$MTF_{GYOG-OMNI-I} = \left| e^{-2\pi^2\sigma^2 f_x^2} + K_1(f_x) \right| \tag{3.11}$$

$$K_1(f_x) = \begin{cases} 0.0065 \ .\pi \cdot f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{15}\right) & f_x \le 15 \\ 0.0035 \ .f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{15}\right) & 15 < f_x < 25 \\ 0 & f_x > 25 \end{cases} \tag{3.12}$$



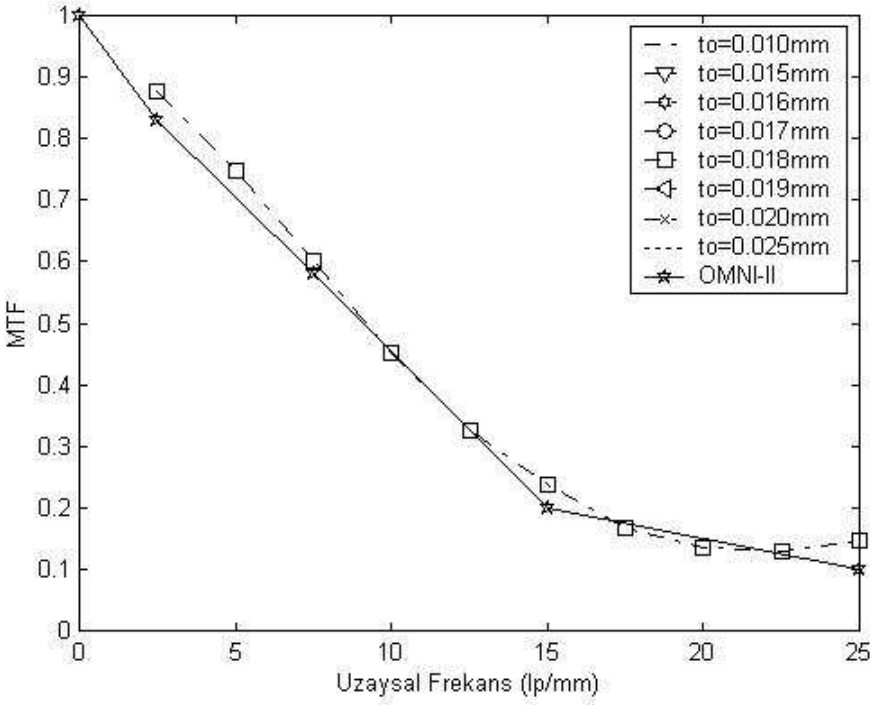

Şekil 3.18 1. Nesil GGC için ölçülen MTF değeri ile 18 mikrona denk gelen spot çapına göre Regüle edilmiş analitik MTF

**2. Nesil OMNI-II için MTF,**

Benzer olarak 2. Nesil için geliştireceğimiz regülasyon katsayısına $K_2$ dersek; 2. Nesil GGC için Eşitlik 3.13'deki MTF'i, Eşitlik 3.14'deki $K_2$ değerine bağlı olarak elde ederiz. Böylece 2. Nesil GGC için MTF değeri Eşitlik 3.14 yardımı ile şekil 3.19'deki gibi çizilebilir.

$$MTF_{GYOG-OMNI-II} = \left[ e^{-2\pi^2\sigma^2 f_x^2} + K_2(f_x) \right] \tag{3.13}$$

$$K_2(f_x) = \begin{cases} 0.006\ .\pi \cdot f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{15}\right) & f_x \le 15 \\ 0.01\ .f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{15}\right) & 15 < f_x < 25 \\ 0 & f_x > 25 \end{cases} \tag{3.14}$$




Şekil 3.19 2. Nesil GGC için ölçülen MTF değeri ile 18 mikrona denk gelen spot çapına göre Regüle edilmiş analitik MTF

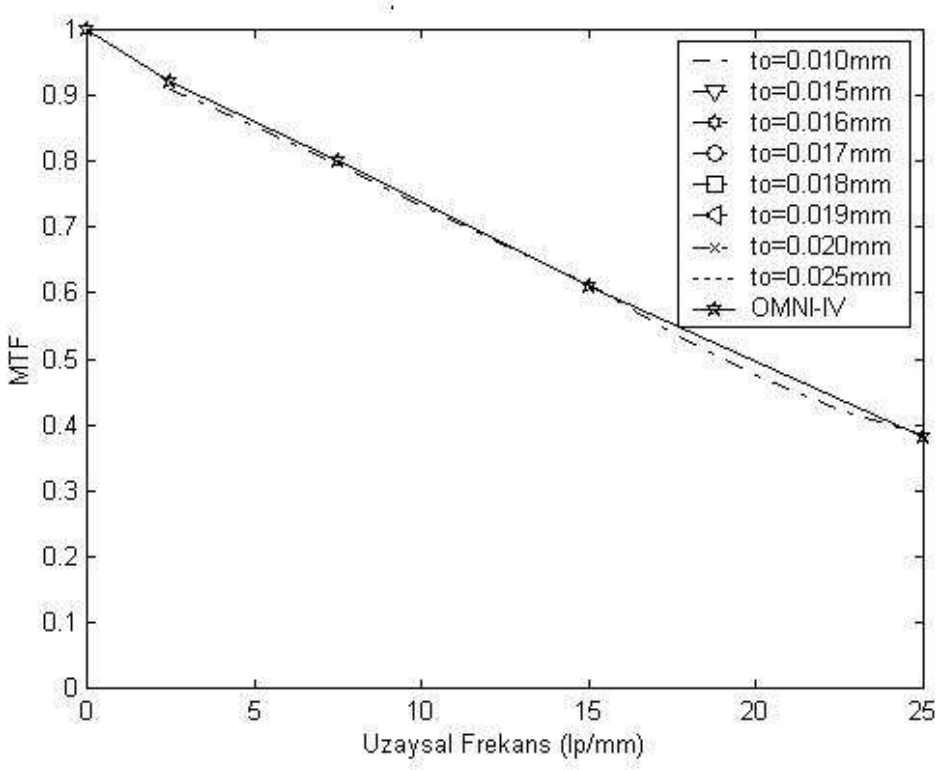
**4. Nesil OMNI-IV için MTF,**

Yine Benzer olarak 4. Nesil için geliştireceğimiz regülasyon katsayısına $K_4$ dersek; 4. Nesil GGC için Eşitlik 3.15'deki MTF'i, Eşitlik 3.16'daki $K_4$ değerine bağlı olarak elde ederiz. Böylece 4. Nesil GGC için MTF değeri Eşitlik 3.16 yardımı ile şekil 3.20'deki

gibi çizilebilir. Bu sonuçdan, 4. Nesil GGC MTF'i açısından, ölçülen MTF değerine yüksek doğrulukla spot çapına bağlı, Gaussian+logaritmik bir analitik MTF formülü bulunabileceği görülmektedir.

$$MTF_{GYOG-OMNI-IV} = \left| e^{-2\pi^2\sigma^2 f_x^2} + K_4(f_x) \right| \tag{3.15}$$

$$K_4(f_x) = \begin{cases} 0.0055\ .\pi \cdot f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{15}\right) & f_x \le 15 \\ 0.01\ .f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{15}\right) & 15 < f_x < 25 \\ 0 & f_x > 25 \end{cases} \tag{3.16}$$




Şekil 3.20 4. Nesil GGC için ölçülen MTF değeri ile 10 mikrona denk gelen spot çapına göre Regüle edilmiş analitik MTF

**MTF dedektör-CCD**

Tez çalışmasında kullanılan DC-4380 Akita fotoğraf makinesi (şekil 1.13.a'da gösterilen ICCD'de kullanılmaktadır.) 1.600x1.200 piksel CCD sensörü için (Ek 7) algılayıcı boyutu, eni ve boyu sırasıyla yaklaşık 2,8 μm ve 2,8 μm olarak hesaplanmaktadır.

$MTF_{dedektör}$ ün burada $MTF_{CCD}$ 'ye eşit kabul edildiği görülmektedir. Bu durumda CCD'nin dikdörtgen bir yapıda olduğu da göz önünde bulundurulursa;

Bir dikdörtgen dedektörün iki boyutlu uzaysal tepkisi Holst tarafından Eşitlik 3.17'de gösterildiği şekilde verilmektedir (Holst 1996).

$$MTF_{dedektör}(f_x, f_y) = \frac{\sin(\pi.d_H.f_x)}{\pi.d_H.f_x}\frac{\sin(\pi.d_v.f_y)}{\pi.d_v.f_y} \tag{3.17}$$

Burada; $d_H$ :Yatay yöndeki algılayıcı alanı (mm), $d_v$ :Dikey yöndeki algılayıcı alanı (mm) $f_x$ : Yatay uzaysal frekans (çizgi çifti/mm), $f_y$ : Dikey uzaysal frekansı (çizgi çifti/mm) göstermektedir. Teorik hesaplamalar açısından; % 100 doldurma-faktörü ile, pikselin alanı, algılayıcı alanına eşit kabul edilmektedir. Eşitlik 3.17'de iki boyutlu bir dedektörün MTF hesaplaması verilmekle birlikte; pratikte tek boyutlu dedektör hesabı daha çok tercih edilmekte ve tek bir dikdörtgen biçiminde algılayıcının bir boyutlu spektral tepkisi Holst tarafından Eşitlik 3.18'deki şekilde verilmektedir.

$$MTF_{dedektör}(f_i) = \frac{\sin(\pi.d.f_i)}{\pi.d.f_i} \tag{3.18}$$

Burada; $f_i$ : Sanal uzaysal frekans (çizgi çifti/mm), $d$ : Algılayıcı genişliği (mm) göstermektedir.

$MTF_{CCD}(f_x)$ ve $MTF_{CCD}(f_y)$'yi hesaplarsak,

$$MTF_{CCD}(f_x, f_y) = MTF_{CCD}(f_x) \cdot MTF_{CCD}(f_y) \tag{3.19}$$

olarak bulunur. Eşitlik 3.18'daki yaklaşım kullanılarak; CCD MTF'ini bir boyutlu eksenel spektral tepkisi olarak alırsak; Eşitlik 3.20 elde edilir.

$$MTF_{CCD}(f_x) = \frac{\sin(\pi . d_H . f_x)}{\pi . d_H . f_x}, \quad d_H \cong 2{,}8\mu m \text{ için} \tag{3.20}$$

Buradaki değerler tek tek bulunup yerine konursa çizelge 3.7'daki sonuçlar elde edilir. Burada asıl etkin parametre olan yatay genişliği $d_H$=2,8 μm için uzaysal frekans Eşitlik 3.21'deki gibi,

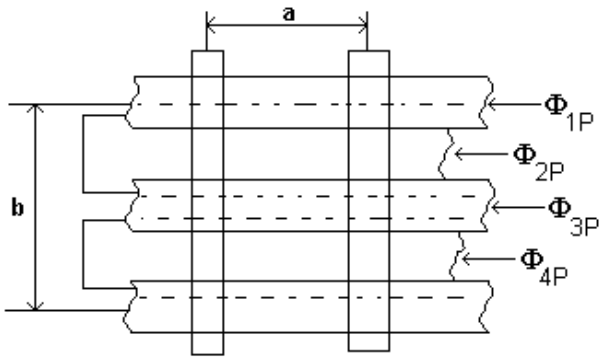
$f_{CH}$: Yatay kesim frekansı $f_{CH}=\frac{1}{d_H} = 357$ çizgi çifti/mm (3.21)

olarak bulunmaktadır.

Çizelge 3.7 Yatay uzaysal frekansa bağlı olarak MTF'in değişimi

| $f_x$ lp/mm | $f_x$ lp/mm | $\pi . d_H . f_x$ | $\mathrm{Sin}(\pi . d_H . f_x)$ | $\frac{\mathrm{Sin}(\pi . d_H . f_x)}{\pi d_H . f_x}$ | *MTF* (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | $\frac{0}{0}, \frac{\pi \cdot d_H}{\pi \cdot d_H}\cos(\pi \cdot d_H . f_x) = 1$ | 100 |
| $1/(8\ d_H)$ | 44,64 | $\frac{\pi}{8}$ | 0,3827... | 0,97449 | 97,45 |
| $1/(4\ d_H)$ | 89,28 | $\frac{\pi}{4}$ | $1/\sqrt{2}$ | 0,90 | 90 |
| $1/(2\ d_H)$ | 178,57 | $\frac{\pi}{2}$ | 1 | 0,6366 | 63,6 |
| $1/(d_H)$ | 357,14 | $\pi$ | 0 | 0 | 0 |

Bu değer bize $MTF_{CCD}(f_x)$'in 25 çizgi çifti/ mm frekansı için yaklaşık % 99 civarında olduğunu ve optik bozulmanın ihmal edilebileceğini göstermektedir. Dedektörün şekil 3.21'de gösterilen algılama alanı Eşitlik 3.22'deki gibi bulunur (Gül 2003).




Şekil 3.21 CCD formatında algılama alanı görünümü

Yatay=1.600 piksel $4{,}536\ \text{mm}=a_H\times 1600$ buradan $a_H=2{,}8\ \mu\text{m}$

Düşey=1.200 piksel $3{,}416\ \text{mm}=b_v\times 1200$ buradan $b_v=2{,}8\ \mu\text{m}$

Temel foton hissedici alan= $2{,}8\times 2{,}8\ \mu m^{2}=7{,}84\times 10^{-12}\ \text{m}^2$ (3.22)

Dedektör alanı=4,536 mm×3,416 mm temel foton hissedici için alan=0,155 $\text{cm}^2$ olarak bulunur. Buradan hareketle; 1 $\text{cm}^2$ lik bir alan düşünüldüğünde birim alana yaklaşık 12 milyon 380.000 adet piksel sığabilmektedir. Bu ise; 0,155 $\text{cm}^2$ lik alanda 1.920.000 adet pikselin mevcut olduğunu gösterir ki bu durumda katalog bilgisi de tanıtlanmış olmaktadır.

**MTF sinyal-zinciri**

$MTF_{sinyal\text{-}zincir}$; Elektronik sinyal işlemede herhangi bir kayıp olmadığı varsayılabilir. Bundan dolayı $MTF_{sinyal\text{-}zincir}=1$ olarak kabul edilir.

**MTF ekran**

Yapılan çalışmalarda kullanılan Akita CCD kameranın LCD ekranı ile ilgili detaylı bilgiler üretici katalogunda bulunamadığından, benzer bir LCD ekran olan ve yüksek lisans çalışmalarında yapılan ICCD'de kullanılan numerik değerler esas alınarak $MTF_{ekran}$ analizi yeni ICCD için de yapılmıştır. MTF ekran için dikey ve yatay eksen için Eşitlik 3.23 ve Eşitlik 3.24'de gösterilen ve Holst tarafından verilen eşitlik kullanılmıştır (Holst 1996).

$$\mathrm{MTF}_{\mathrm{Ekran(fx)v}} \cong e^{-2\pi^2\left(\frac{N_v d_v}{2{,}35\cdot NTV_v} f_x\right)^2} \tag{3.23}$$

$$\mathrm{MTF}_{\mathrm{Ekran(fx)}_h} \cong e^{-2\pi^2\left(\frac{N_H d_H}{2{,}35\cdot NTV_H} f_x\right)^2} \tag{3.24}$$

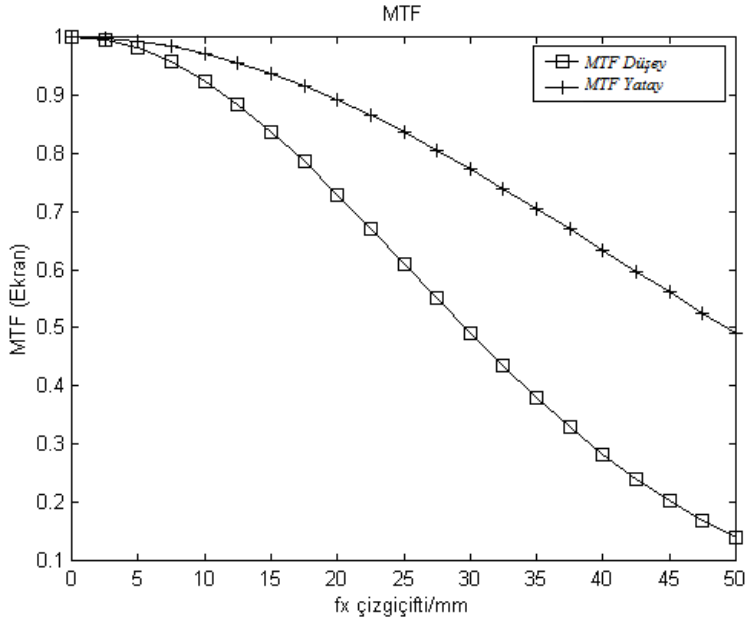
Burada; $N_v$ : Düşey dedektör sayısı , $N_H$ : Yatay dedektör sayısı,
$d_v$ : Düşey dedektör genişliği (mm), $d_H$ : Yatay dedektör genişliği (mm)
$N_{TVV}$ : Düşey ekran çözünürlüğü TVL/PH , $N_{TVH}$ : Yatay ekran çözünürlüğü TVL/PH
$f_x$ : Uzaysal frekans(lp/mm) olmak üzere; gerekli olan değerler hesaplanarak $\mathrm{MTF}_{\mathrm{ekran}}$ bulunur .

Burada hesaplamalarda kullanılacak değerler;
$N_v$ : 582 , $N_H$ : 752, $d_v$ : 8,3 ( $\mu$ m), $d_H$ : 8,6 ( $\mu$ m), $N_{TVV}$ : 420 TVL/PH, $N_{TVH}$ : 560 TVL/PH
$\mathrm{MTF}_{\mathrm{ekran\text{-}yatay}}$ ve $\mathrm{MTF}_{\mathrm{ekran\text{-}düşey}}$ verilere bağlı olarak çizelge 3.8'deki gibi bulunur.

Çizelge 3.8 $\mathrm{MTF}_{\mathrm{ekran}}$ değerleri

| **fx Çizgiçifti/mm** | MTF_v | MTF_h | **fx Çizgiçifti/mm** | MTF_v | MTF_h |
|---|---|---|---|---|---|
| **0** | 1.0000 | 1.0000 | **27,5** | 0.5505 | 0.8058 |
| **2,5** | 0.9951 | 0.9982 | **30** | 0.4914 | 0.7734 |
| **5** | 0.9805 | 0.9929 | **32,5** | 0.4344 | 0.7396 |
| **7,5** | 0.9566 | 0.9841 | **35** | 0.3802 | 0.7048 |
| **10** | 0.9241 | 0.9719 | **37,5** | 0.3295 | 0.6693 |
| **12,5** | 0.8840 | 0.9564 | **40** | 0.2828 | 0.6333 |
| **15** | 0.8373 | 0.9378 | **42,5** | 0.2403 | 0.5971 |
| **17,5** | 0.7853 | 0.9163 | **45** | 0.2022 | 0.5609 |
| **20** | 0.7292 | 0.8921 | **47,5** | 0.1685 | 0.5251 |
| **25** | 0.6106 | 0.8366 | **-** | - | - |

Şekil 3.22'de $MTF_{ekran}$ değerlerinin çizelge 3.8'ye göre çizimi gösterilmektedir.




Şekil 3.22 $MTF_{ekran}$ değerlerinin çizimi.

**MTF Sonuç**

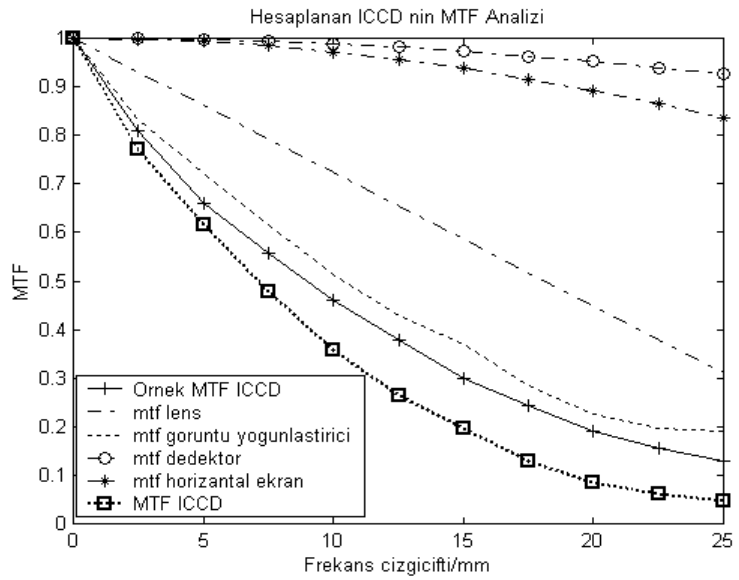
Yukarıda elde ettiğimiz tüm $MTF_{ICCD}$ formül değerlerini Eşitlik 3.25'de yerleştirilirse; ICCD'nin performansını uzaysal frekansa bağlı olarak gösterecek olan analitik ICCD MTF'i elde edilmiş olur.

$$MTF_{ICCD} = MTF_{optik} \cdot MTF_{g.yoğ.} \cdot MTF_{ekran} \tag{3.25}$$

$$MTF_{ICCD} = \left[1 - \frac{4}{\pi}\left(\frac{f_x \lambda}{D_0}\right)\right] \cdot \left[e^{-2\pi^2\sigma^2 f_x^{\,2}} + K(f_x)\right] \cdot \left[e^{-2\pi^2\left(\frac{N \cdot d \cdot f_x}{2{,}35NTV}\right)^2}\right] \tag{3.26}$$

$$K(f_x) = \begin{cases} 0{,}01 \cdot \pi \cdot f_x \cdot \ln\left(\dfrac{f_x}{15}\right) & f_x \le 15 \\ 0{,}01 \cdot f_x \cdot \ln\left(\dfrac{f_x}{15}\right) & 15 < f_x < 25 \\ 0 & f_x > 25 \end{cases} \tag{3.27}$$

ICCD'nin MTF'inde şekil 3.23'den görüleceği üzere; optik grubun, özellikle gece görüş cihazının MTF'i baskın olmaktadır, her ne kadar dedektör grubu, elektronik aksam ve göstergeden de kaynaklanan kayıplar da olmakla birlikte; bu kayıplar gece görüş ve optik grubuna göre daha düşük kayıp olarak görülmektedirler.




Şekil 3.23 ICCD' nin analitik MTF değerlerinin çizimi

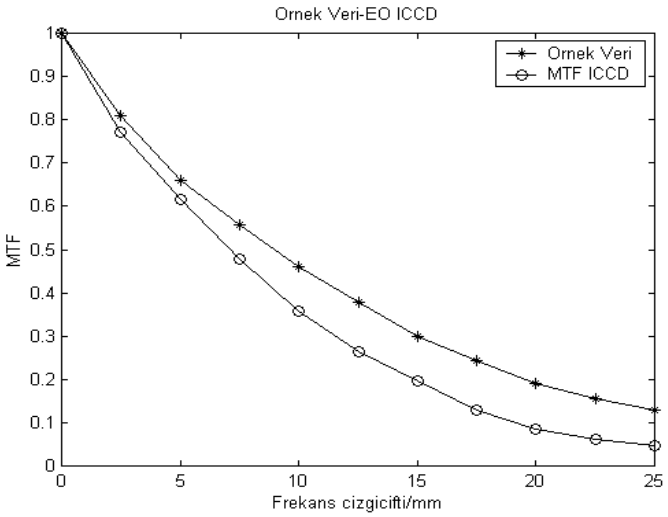
Optik sistemler için bazı yaklaşık analitik açıklamalar literatürde de mevcuttur; ancak bu açıklamalar sadece gerçek deneyler ile elde edilmiş MTF'nin kaba tahminini sağlamaktadırlar. ICCD için önerilen analitik MTF formülasyonu da sadece ölçülen değerlerle karşılaştırılarak kabul edilebilir. Dolayısıyla ICCD'nin MTF'i, GGC'nin analitik MTF'i için önerilen regülasyonunun, GGC'yi alt bileşen olarak kapsayan bir optik sistemin MTF'ni de geliştirdiğini kanıtlamak için analiz edilmiştir. GGC için önerilen MTF formülü kullanıldığında, bulunan ICCD MTF'nin deneylerle elde edilen MTF değerlerine daha yakın MTF değerleri verdiği gösterilmiştir. Gerçek ICCD MTF değerleri ya da ilişkili veriler genelde açık kaynaklarda yayımlanmasa da, deneysel olarak elde edilen ICCD MTF'i "Laser Focus World Magazine"de Eylül 1995'te Williams tarafından yayınlanmıştır (Williams 1995). Burada verilen ICCD MTF'i, yeni geliştirilen analitik MTF ile deneysel olarak ölçülen MTF'i karşılaştırma olanağı sağlamıştır. Şekil 3.24'de; hem deneysel MTF'i, hem de Eşitlik 3.11 tarafından verilen analitik MTF sonucu görülmektedir. Şekil 3.24'den açık şekilde görülebileceği gibi, analitik çözüm kullanılarak elde edilen MTF, 25 çizgiçifti/mm'ye kadar ölçülen MTF

değerine yakındır. Bu çalışma ile önerilen regülasyon özellikle düşük frekanslarda daha iyi sonuçlar üretmektedir; artan uzaysal frekansla diğer optik ve ekran MTF'lerin kayıplarının da daha fazla belirsizlik getirmesi ile uyumun kötüleştiği görülmekle birlikte; kesim frekansına kadar tüm frekans spektrumu için analiz edildiğinde, önerilen analitik regülasyon sayesinde, ölçüm sonuçlarına göre bir iyileştirme sağlanmaktadır. Analitik $MTF_{ICCD}$ ile (Williams 1995)'de yer alan örnek veri mukayese edilerek çizelge 3.9'da sunulmuştur .

Çizelge 3.9 Örnek veri ile hesaplanan $MTF_{ICCD}$ farkı

| $f_x$ | Örnek veri | Hesaplanan veri | Fark | % fark |
|---|---|---|---|---|
| **2,5** | 0,8100 | 0,7726 | 0,0374 | 3,7411 |
| **7,5** | 0,5585 | 0,4773 | 0,0812 | 8,1243 |
| **15** | 0,3000 | 0,1970 | 0,1030 | 10,3041 |
| **25** | 0,1300 | 0,0457 | 0,0843 | 8,4281 |

$MTF_{ICCD}$'nin hesaplanan sonuçları incelendiğinde, Çizelge 3.9'daki örnek veriye göre ortalama % 7.6'lik bir hata getirmektedir[9]. Elde edilen veriler Şekil 3.24'de görülmektedir.




Şekil 3.24 Örnek veri ile hesaplanan $MTF_{ICCD}$'nin mukayesesi

[9] Regülasyonsuz MTF analizinde ise sadece GGC'nin MTF analizinde dahi yüzde yirmi civarında bir hata oranı tespit edildiği göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3.7 IR Kaynak Analizi

Şekil 2.2'de çalışma prensibi gösterilen aktif görüntüleme sisteminde birinci unsuru olan ve algılayıcı birimini oluşturan ICCD ile ikinci önemli unsuru IR kaynağın uyumlu çalışması sistemin başarım ölçütüdür. Bu sebeple dalgaboyu seçimi en önemli aşama olarak karşımıza çıkmaktadır. Çünkü spektral tepki ve dalgaboyu birbine uyumlu olmadığı zaman aktif yöntem de görüntü elde edilememektedir. Tez çalışması sırasında başlangıçta multialkali fotokatodlu ikinci nesil GGC'ları ile de denemeler yapılmış, ancak verimli sonuç alınamamıştır. Yapılan incelemede bunun ikinci nesil GGC'nin fotokatodundan kaynaklandığı görülmüştür. Bu sebeple 880 nm'de ışıma yapacak bir aktif görüntüleme için üçüncü nesil GGC'nın GaAs fotokatodunun 600-900 nm arasında olan spektral tepkisinin yeterli olduğu görülmüştür.

# 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

## 4.1 Yapılan Ölçümler

ICCD kamera yapımında (Gül 2003)'den elde edilen deneysel sonuçlardan ve pasif sistemlerin mukayesesi amacıyla yararlanılmıştır. Karanlık oda ölçümlerinde ortam aydınlatmasında 6 seviyeli bir aydınlatma sistemi kullanılmıştır. Aydınlatma seviyeleri ve bu değerlere denk gelen doğal ışık şiddetleri çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1 Aydınlatma seviyeleri ve denk gelen doğal ışık şiddeti

| Anahtar konumu | Işık şiddeti | $Log_{10}$ değeri | Doğal ışık seviyesi |
|---|---|---|---|
| Seviye-1 | 1960 mlux | 3,3 | Alacakaranlık-tan vakti |
| Seviye-2 | 456 mlux | 2,6 | Dolunay ışığı |
| Seviye-3 | 190 mlux | 2,3 | Yarım ay ışığı |
| Seviye-4 | 22 mlux | 1,3 | Açık hava koşulu |
| Seviye-5 | 4 mlux | 0,6 | Kapalı hava koşulu |
| Seviye-6 | 2 mlux | 0,3 | Çok kapalı hava koşulu |

Karanlık oda çalışmalarında; "2.4 MTF ve Ayırma Gücü Analizi" başlığı altında anlatılan USAF 1951 ABD MTF askeri hedefi kullanılarak pasif sistemlerin ayırma güçleri sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada GGC, CCD ve ICCD pasif sistemleri kullanılmıştır. Kişisel hataları minimize etmek için 5 değişik personel ile ölçümler yapılmış, çizelge 4.2-4.12'de verilen sonuçlara ulaşılmıştır (Gül 2003).

### USAF 1951 Test Hedefi İle Gerçekleştirilen Ayırma Gücü Testi (Grup/Eleman)

Çizelge 4.2 Grup/Eleman cinsinden 1. Eleman için test sonuçları[10]

| HEDEF NO: | IŞIK ŞİDDETİ | İNSAN GÖZÜ (1.Kişi) | GECE GÖRÜŞ CİHAZI | CCD KAMERA | ICCD |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1,960 lux | 1/3 | 1/4 | 3/6 | 0/3 |
| **3** | 0,456 lux | 1/1 | 1/5 | 3/6 | 0/3 |
| **5** | 0,190 lux | - | 1/5 | 3/4 | 0/3 |
| **9** | 0,022 lux | - | 1/3 | 2/2 | 0/3 |
| **11** | 0,004 lux | - | 1/4 | - | 0/4 |
| **13** | 0,002 lux | - | 1/4 | - | 0/3 |

[10] USAF 1951 Hedefi için Şekil 2.16'ya bakınız.

Ayırma gücü tespitinin anlaşılabilmesi için çizelge 4.2'yi inceleyecek olursak, birinci eleman ile yapılan ayırma gücü testinde; karanlık odada ışık şiddeti önce "alacakaranlık-tan vakti"ne denk gelen 1960 mlux seviyesine getirilmekte ve deney elemanından şekil 2.16'da verilen USAF 1951 Test Hedefinden hangi üçlü bar hedefini seçebildiğini not alması söylenmektedir, burada 1. eleman bu ışık koşulunda 1.Grup, 3. Elemanı ayırt edebilmiştir. USAF 1951 Test hedefine baktığımız da; ortada üzerinde 1 yazan üçlü bar grubunun üstten ikinci bar hedefini ayırt edebildiği anlaşılmaktadır. Ayırma gücünün tespiti açısından ölçüm yapan elemanın hedefi ayırt edemeyeceği düşük aydınlatma sınırına kadar tedricen ışık şiddeti azaltılarak ölçümlere devam edilmektedir. Dolayısı ile ikinci ölçümde bu sefer karanlık odanın aydınlık seviyesi "dolunay ışığı"na denk gelen 456 mlux seviyesinde aydınlatılarak aynı elemana hangi hedefi ayırt edebildiği sorulmaktadır. Çizelge 4.3'deki sonuca göre 1. elemanın bu ışık koşulunda ayırma gücü düşmekte ve ortada üzerinde 1 yazan üçlü bar grubunun birinci bar hedefini ayırt edebildiği anlaşılmaktadır. Benzer şekilde cihaz ayırma gücü ölçümlerinde de cihaz ile optimum görüntü alınacak optik ayarlamalar yapıldıktan sonra aydınlatma ile ilgili hususlar aynen uygulanarak elemanlara cihaz yardımı ile hangi hedefi ayırt edebildiği sorulmaktadır. Birinci elemanın CCD kamera ile en son ayırt ettiği hedef "açık hava koşulu" na denk gelen 22 mlux altında 2.Grup 2. Elemandır. Bulunan bu Grup/Eleman dönüşümlerini çizelge 2.1 vasıtasıyla yorumlayacak olursak; 1. elemanın CCD ile açık hava koşuluna denk gelen ışık altında ayırt edebileceği çizgi çifti/mm uzaysal frekans değeri çizelge 2.1'in 2. Grubu ile 2. Elemanının kesiştiği noktada okuduğumuz 4.49 çizgi çifti/mm değeridir. Benzer olarak bütün ölçümler tamamlandığında 1. eleman için ayırma gücü test sonuçları elde edilmiş olur. Bu şekilde diğer personel için de elde edilen ölçümler çizel 4.3- 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.3 Grup/Eleman cinsinden 2. Eleman için test sonuçları

| HEDEF NO: | IŞIK ŞİDDETİ | İNSAN GÖZÜ (2.Kişi) | GECE GÖRÜŞ CİHAZI | CCD KAMERA | ICCD |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1,960 lux | 1/3 | 1/6 | 3/6 | 0/5 |
| **3** | 0,456 lux | 0/5 | 1/6 | 3/6 | 0/5 |
| **5** | 0,190 lux | 0/5 | 1/5 | 3/5 | 0/4 |
| **9** | 0,022 lux | - | 1/5 | 2/2 | 0/3 |
| **11** | 0,004 lux | - | 1/4 | - | 0/3 |
| **13** | 0,002 lux | - | 1/4 | - | 0/2 |

Çizelge 4.4 Grup/Eleman cinsinden 3. Eleman için test sonuçları

| HEDEF NO: | IŞIK ŞİDDETİ | İNSAN GÖZÜ (3.Kişi) | GECE GÖRÜŞ CİHAZI | CCD KAMERA | ICCD |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1,960 lux | 1/3 | 1/2 | 3/6 | 0/3 |
| **3** | 0,456 lux | 0/1 | 1/3 | 3/6 | 0/3 |
| **5** | 0,190 lux | - | 1/3 | 3/6 | 0/5 |
| **9** | 0,022 lux | - | 1/3 | 2/4 | 0/5 |
| **11** | 0,004 lux | - | 1/3 | - | 0/4 |
| **13** | 0,002 lux | - | 1/3 | - | 0/4 |

Çizelge 4.5 Grup/Eleman cinsinden 4. Eleman için test sonuçları

| HEDEF NO: | IŞIK ŞİDDETİ | İNSAN GÖZÜ (4.Kişi) | GECE GÖRÜŞ CİHAZI | CCD KAMERA | ICCD |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1,960 lux | 1/3 | 1/4 | 3/6 | 0/3 |
| **3** | 0,456 lux | 1/1 | 1/5 | 3/6 | 0/3 |
| **5** | 0,190 lux | - | 1/5 | 3/6 | 0/3 |
| **9** | 0,022 lux | - | 1/3 | 2/2 | 0/2 |
| **11** | 0,004 lux | - | 1/3 | - | 0/4 |
| **13** | 0,002 lux | - | 1/4 | - | 0/4 |

Çizelge 4.6 Grup/Eleman cinsinden 5. Eleman için test sonuçları

| HEDEF NO: | IŞIK ŞİDDETİ | İNSAN GÖZÜ (5.Kişi) | GECE GÖRÜŞ CİHAZI | CCD KAMERA | ICCD |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1,960 lux | 1/6 | 1/3 | 3/6 | 0/3 |
| **3** | 0,456 lux | 1/2 | 1/4 | 3/6 | 0/2 |
| **5** | 0,190 lux | - | 1/4 | 3/4 | 0/2 |
| **9** | 0,022 lux | - | 1/4 | 2/2 | 1/2 |
| **11** | 0,004 lux | - | 1/3 | - | 1/2 |
| **13** | 0,002 lux | - | 1/4 | - | 1/2 |

Hangi grubun hangi elemanının ayırt edilebildiğine dayanan bu test neticesi elde edilen değerlerin denk gelen çizgiçifti/mm değerleri için çizelge 2.1'den yaralanılır. Çizelge 2.1'deki Grup-Elemandan denk gelen uzaysal frekans çizgi çifti/mm cinsinden bulunup yazılırsa, ayırma güçleri bulunmuş olur. Çizelge 4.7-4.12, sırasıyla çizelge 4.1-4.6'ya denk gelecek Grup-Eleman'dan çizgi çifti/mm frekansında ayırma gücüne dönüşümü göstermektedir.

**USAF 1951 Test Hedefi İle Ayırma Gücü Dönüşümü Çizgiçifti/mm)**

Çizelge 4.7 Çizgiçifti/mm uzaysal frekans cinsinden 1.Eleman test sonuçları

| HEDEF NO: | IŞIK ŞİDDETİ | İNSAN GÖZÜ (1. Kişi) | GECE GÖRÜŞ CİHAZI | CCD KAMERA | ICCD |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1,960 lux | 2,52 | 2,83 | 14,3 | 1,26 |
| **3** | 0,456 lux | 2 | 3,17 | 14,3 | 1,26 |
| **5** | 0,190 lux | - | 3,17 | 11,3 | 1,26 |
| **9** | 0,022 lux | - | 2,52 | 4,49 | 1,26 |
| **11** | 0,004 lux | - | 2,83 | - | 1,41 |
| **13** | 0,002 lux | - | 2,83 | - | 1,26 |

Çizelge 4.8 Çizgiçifti/mm uzaysal frekans cinsinden 2.Eleman test sonuçları

| HEDEF NO: | IŞIK ŞİDDETİ | İNSAN GÖZÜ (2. Kişi ) | GECE GÖRÜŞ CİHAZI | CCD KAMERA | ICCD |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1,960 lux | 2,52 | 3,56 | 14,3 | 1,59 |
| **3** | 0,456 lux | 1,59 | 3,56 | 14,3 | 1,59 |
| **5** | 0,190 lux | - | 3,17 | 12,7 | 1,41 |
| **9** | 0,022 lux | - | 3,17 | 4,49 | 1,26 |
| **11** | 0,004 lux | - | 2,83 | - | 1,26 |
| **13** | 0,002 lux | - | 2,83 | - | 1,12 |

Çizelge 4.9 Çizgiçifti/mm uzaysal frekans cinsinden 3.Eleman test sonuçları

| HEDEF NO: | IŞIK ŞİDDETİ | İNSAN GÖZÜ (3. Kişi) | GECE GÖRÜŞ CİHAZI | CCD KAMERA | ICCD |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1,960 lux | 2,52 | 2,24 | 14,3 | 1,26 |
| **3** | 0,456 lux | 1,26 | 2,52 | 14,3 | 1,26 |
| **5** | 0,190 lux | - | 2,52 | 14,3 | 1,59 |
| **9** | 0,022 lux | - | 2,52 | 5,66 | 1,59 |
| **11** | 0,004 lux | - | 2,52 | - | 1,41 |
| **13** | 0,002 lux | - | 2,52 | - | 1,41 |

Çizelge 4.10 Çizgiçifti/mm uzaysal frekans cinsinden 4.Eleman test sonuçları

| HEDEF NO: | IŞIK ŞİDDETİ | İNSAN GÖZÜ (4. Kişi) | GECE GÖRÜŞ CİHAZI | CCD KAMERA | ICCD |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1,960 lux | 2,83 | 2,83 | 14,3 | 1,26 |
| **3** | 0,456 lux | 2 | 3,17 | 14,3 | 1,26 |
| **5** | 0,190 lux | - | 3,17 | 14,3 | 1,26 |
| **9** | 0,022 lux | - | 2,52 | 4,49 | 1,12 |
| **11** | 0,004 lux | - | 2,52 | - | 1,41 |
| **13** | 0,002 lux | - | 2,83 | - | 1,41 |

Çizelge 4.11 Çizgiçifti/mm uzaysal frekans cinsinden 5.Eleman test sonuçları

| HEDEF NO: | IŞIK ŞİDDETİ | İNSAN GÖZÜ (5. Kişi) | GECE GÖRÜŞ CİHAZI | CCD KAMERA | ICCD |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 1,960 lux | 3,56 | 2,52 | 14,3 | 1,26 |
| **3** | 0,456 lux | 2,24 | 2,83 | 14,3 | 1,12 |
| **5** | 0,190 lux | - | 2,83 | 11,3 | 1,12 |
| **9** | 0,022 lux | - | 2,83 | 4,49 | 2,24 |
| **11** | 0,004 lux | - | 2,52 | - | 2,24 |
| **13** | 0,002 lux | - | 2,83 | - | 2,24 |

Elde edilen değerlerin en iyi ölçüm sonuçları kişisel hatalardan kurtulmak amacıyla tek bir çizelgede değerlendirilirse; sonuç çizelge 4.12'de verildiği şekilde bulunmaktadır.

Çizelge 4.12 Çizgi çifti/mm cinsinden genel test sonuçları

| HEDEF AYDINLATMA IŞIK ŞİDDETİ | İNSAN GÖZÜ | GECE GÖRÜŞ CİHAZI | CCD KAMERA | ICCD KAMERA |
|---|---|---|---|---|
| 1,960 lux | 3,56 | 3,56 | 14,3 | 1,59 |
| 0,456 lux | 2,24 | 3,56 | 14,3 | 1,59 |
| 0,190 lux | - | 3,17 | 14,3 | 1,59 |
| 0,022 lux | - | 3,17 | 5,66 | 2,24 |
| 0,004 lux | - | 2,83 | - | 2,24 |
| 0,002 lux | - | 2,83 | - | 2,24 |

Burada insan gözünün dolunay ışık seviyesi altında ayırma gücünde zorlandığı, CCD kameranın açık hava koşuluna kadar görebildiği, ancak kapalı hava koşulunda göremediği, GGC'nin yüksek ışık seviyelerinde CCD kameraya göre kötü ICCD kameraya göre daha iyi olduğu, ışık seviyesi düştükçe GGC ile ICCD'nin CCD'ye göre algılamada avantajlı duruma geldiği dikkat çekmektedir (Gül ve Efe 2003).

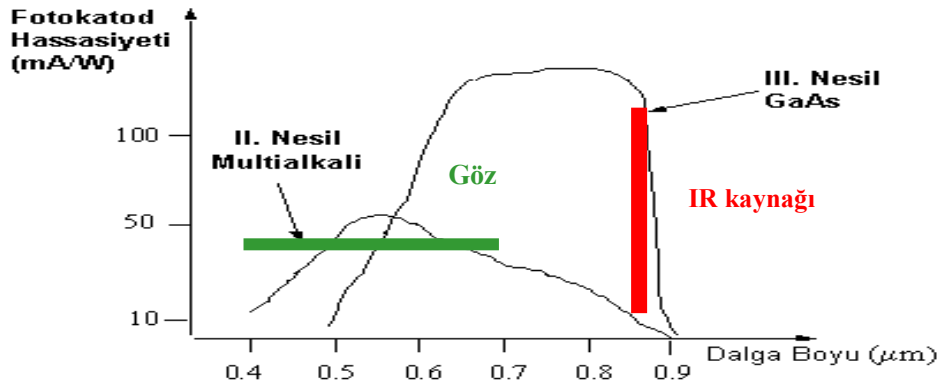
Çizelge 4.2'deki ışıma değerlerini görsel olarak yeniden değerlendirsek şekil 2.1'deki ayırma gücü değerlerine göre bakıldığında diğer sensörler karşısında doğal olarak insan gözü çok yetersiz kalmaktadır. Sayısal olarak nitelendirecek olursak çok düşük ışık koşullarında (4 mlux=0,3716 mftcd) bile GGC ve ICCD ile insan gözünün dolunay ışığında gördüğüne yakın bir ayırma gücü elde edilebilmektedir. Bu ise insanın görme sınırından itibaren ışımanın yaklaşık 100 kat azaltılmasına rağmen ICCD ve GGC ile

görüntü alınabildiğini göstermektedir. Kıyaslanan cihazlar açısından karşılaşılan asıl algılama zorluğu CCD cihazının da sınırı olan yaklaşık 20 mlux değerinin altında (log 22≈1,3) yaşanmakta; bu ise sadece aktif görüntüleme ve termal cihazlar ile aşılmaktadır.

## 4.2 Kızıl ötesi (IR) Işınım Kaynağı Seçiminde Dalgaboyu Analizi ve Aktif Görüntüleme Yöntemi

Doktora çalışmasında hiç ışık olmayan ortamlarda aktif görüntüleme tekniği ile görüntü alınması amaçlanmıştır. Bu sebeple başlangıçta düşük ışık koşullarında algılama yapmak üzere geliştirilen GGC ve ICCD cihazları ile ilgi konular incelenmiş, durum tespitinden sonra hiç ışık olmayan ortamda görüntü alma ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ve elde edilen görüntüler aşağıda verilen örneklerde IR kaynak olup olmadığına ve algılama yapılıp yapılamadığına da vurgu yaparak açıklanmaktadır.

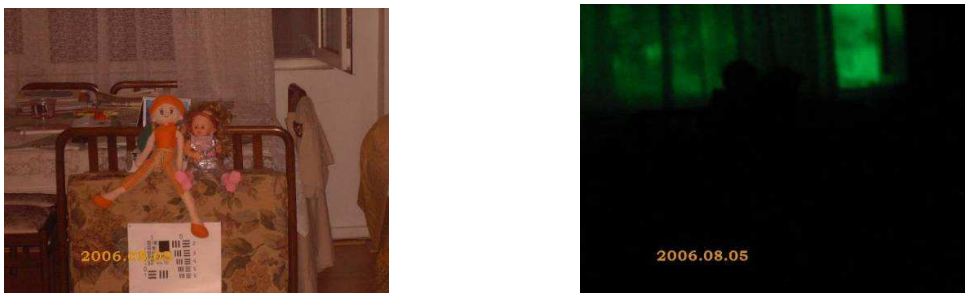
Aktif görüntüleme yönteminde seçilen ışın kaynağının insan gözüne etkisinin en az olması için şekil 4.1'de gösterildiği şekilde ışınım kaynağının dalga boyu 880 nm seçilerek, göz hassasiyet dalga boyu (400-700 nm)'na en uzak nokta seçilmiştir. Dalgaboyunun bu şekilde seçimi ile 3. Nesil GGC'nin en verimli şekilde kullanılması amaçlanmıştır. Eğer 880 nm'nin ötesinde bir kaynak seçilirse GGC'nin değişmesi gerekecektir.




Şekil 4.1 İnsan gözü spektrali ve IR kaynak seçiminde dalgaboyu sınırı

### 4.3 Alınan Görüntüler

Aktif algılama sisteminin getirdiği avantajı gösterebilmenin en iyi yöntemi; seçilen hedefi değiştirmeden aynı ortamın ışık koşullarını değiştirerek mukayese yapılacak sitemler/cihazlar ile kayıtlar almak ve bu görüntüler üzerinden elde edilen görüntüleme üstünlüğünü ifade etmektir. Şekil 4.2 ve 4.3'de önce üç boyutlu bir hedef olması açısından bir oyuncak bebek seçilerek USAF 1951 Test Hedefi ile birlikte görülecek şekilde yerleştirilmiştir. İlk önce şekil 4.2.a.'da görülen normal flaşlı fotoğraf çekilmiştir. Bu görüntü, hedefin ayrıntılarının görülüp daha sonra gece görüş cihazları ile alınacak görüntü kayıtlarının değerlendirilmesinde referans olması amacıyla alınmıştır. Daha sonra şekil 4.2.b'deki görüntü ICCD kamera ile alınmıştır. Ortam yeterince aydınlık olmadığından, dış ortamdan sızan ışık görüntüsü dışında başka bir şey ayırt edilememektedir. İkinci aşamada IR kaynak ile hedef aydınlatılarak aktif algılama yapılmıştır. Burada şekil 4.3.a'daki görüntü elde edilmiştir. Şekil 4.2.b. ile mukayese edildiğinde; aynı ICCD cihazı kullanılmasına rağmen ortamdaki nesnelerin tamamının aktif algılama ile görüntülenebildiği görülmüştür.




**(a)** **(b)**

Şekil 4.2 a. Normal ışık altında flaşlı fotoğraf, b. ICCD ile çekilen fotoğraf

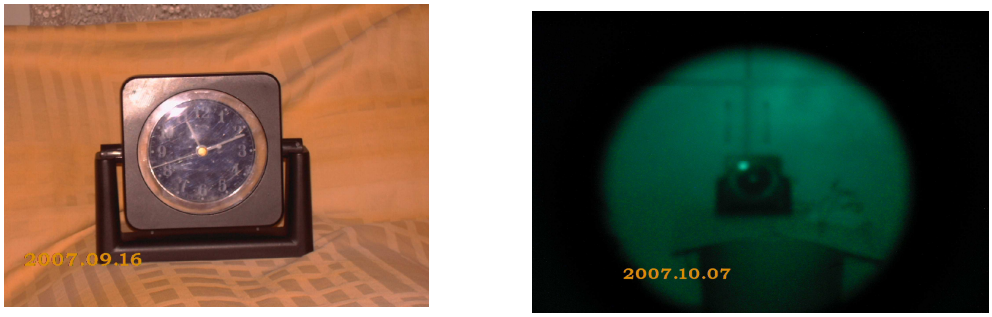



**(a)** **(b)**

Şekil 4.3 a IR ışın kaynaklı geniş açılı fotoğraf, b. dar açılı (zoomlu) fotoğraf.

Benzer olarak aynı aydınlık koşulunda CCD fotoğraf makinesinin (x3 büyütme optik ) zoom özelliğinin fark yaratıp yaratmadığının da görülmesi açısından şekil 4.3.b.'deki görüntü elde edilmiştir. Şekil 4.3.b.'den görüldüğü gibi hem hedef oyuncak bebekler hem de USAF 1951 Test Hedefi algılanabilmektedir.

Aktif algılama ile ne kadar küçük cisimlerin, ne kadar ince cisimlerin ve ne kadar koyu açık renk tonlarındaki farklı hedeflerin algılanabilirliğini araştırmak için değişik hedeflerden aktif algılama ile ICCD vasıtasıyla görüntüler alınarak örnekler üzerinde çalışılmıştır. Bu incelemelerde; normal koşullar altında fotoğrafı çekilen dış yüzeyi ahşap, kadranı siyah renkli olan ve kadranın üzerinde cam koruması olan şekil 4.4.a'da görülen saatin görüntüsü önce ICCD ile alınmaya çalışılmış, ancak ortamda çok düşük ışık seviyesinde olduğundan görüntü alınamamıştır. Daha sonra aktif algılamaya geçilerek saat hedefi IR kaynak ile aydınlatılarak görüntü alınmaya çalışılmış ve ICCD ile şekil 4.4.b'de görülen görüntü alınabilmiştir. Burada saatin kaç olduğu tam olarak görülememekle birlikte, orjinal hedefi bilen gözlemcinin bu hedefin saat olduğunun bilmesi olasılığı yüksektir.




(a) (b)

Şekil 4.4 a. CCD kamera ile Normal flaşla çekilen saat hedef fotoğrafı, b. Aktif görüntüleme ile süre optimizasyonuna dikkat etmeden alınan saat fotoğrafı.

Yine aynı saat hedefi ile ölçümlere devam edildiğinde; bu sefer ICCD'nin anahtarlama işlevinin daha verimli olması açısından, manuel olarak yapılan anahtarlama ile değişik süreler tutularak aktif kaynağın hedef üzerinden yansıma zamanı değiştirilerek bu olayın görüntüleme üzerindeki etkisi ölçülmeye çalışılmıştır. Burada şekil 4.5.a'daki görüntü alınabilmiştir, bu görüntü şekil 4.4.b'de görülen görüntü ile mukayese edildiğinde anahtarlama işlevi sayesinde aktif algılamada daha verimli görüntülerin alınabileceği,

bu sayede uygun bir frekansda örnekleme yapmak suretiyle ve otomatik olarak bir bilgisayarlı sistem ile anahtarlama yapılması halinde şekil 4.5.a'daki görüntü düzeyinde bir kayıdın sürekli modda alınabileceği öngörülmektedir.



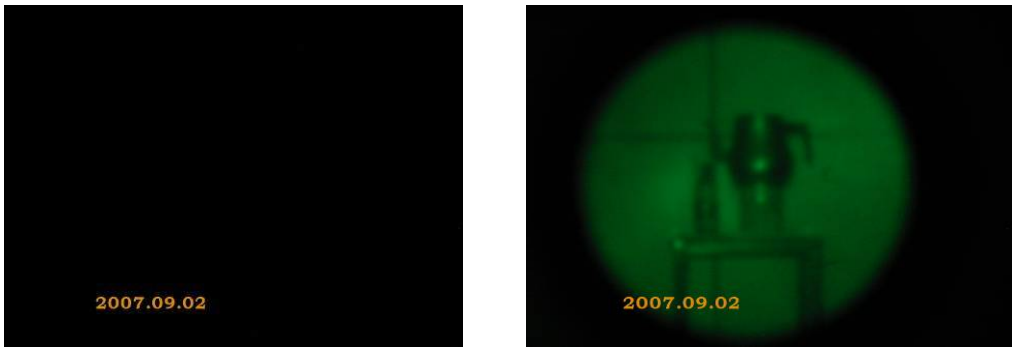
Şekil 4.5 IR ışın kaynağı ile süre optimizasyon sağlanarak çekilmiş bir görüntü

Aynı saat hedefinin ön yüzeyinin cam olması sebebiyle IR kaynağın yansıma durumu da incelenmek istenmiş ve saat hedefi IR kaynağa ve ICCD'ye değişik açılarda tutularak aktif görüntü kaydı alınmıştır. Burada da şekil 4.4.b'ye benzer görüntüler alınmakla birlikte; hedef ile ICCD'nin birbirini tam düz olarak gördüğü bir pozisyonda saat hedefinin retro-reflektör gibi davrandığı görülerek şekil 4.6'daki görüntü elde edilmiştir. Bu görüntüde yine çıplak gözle bakıldığında herhangi bir bir şey görülmemekte, IR kaynak susturulduğunda da yansımalı görüntü kaybolmaktadır. Şekil 4.4.b ile şekil 4.6'nın bir diğer farkı da yansıma sebebiyle GGC'nin fosfor ekranında yarattığı iz olmaktadır. Şekil 4.4.b'deki görüntüde IR kaynak kapatıldığında görüntü hemen yok olurken şekil 4.6'da yansımanın olduğu parlak nokta yavaş yavaş sönmekte, GGC'nin fosfor ekranı zamanla normale dönmektedir.




Şekil 4.6 IR ışın kaynağının saat hedefinden dik konumlu olarak yansıması

Aktif algılama yöntemi ile yapılan bir diğer görüntüleme çalışması farklı maddelerden yapılmış cisimlerin aktif algılama ile görüntülenmesindeki farklılıkların tespit edilmesine yönelik çalışmadır. Bu çalışmada hedef olarak bir plastik su şişesi, bir konserve kutusu ve bir aleminyum çaydanlık kullanılmıştır. Şekil 4.6.a'da ortamda IR ışın kaynağının olmadığı durumda, metal hedeflerden de herhangi bir görüntünün alınamadığını, plastik veya metal hedefin pasif algılama açısından bir farklılığı olmadığını göstermektedir. Şekil 4.7.b'de ise aktif algılama ile IR kaynak sayesinde görüntünün alınabildiği görülmektedir. Burada şekil 4.7.b'nin orta solunda plastik su şişesi, şişe ile aynı düzlemde konserve kutusunu ve kutunun üzerindeki aleminyum çaydanlık fark edilmektedir. Arka planda görülen zemin, ahşap dolap kapısıdır, kapıların birleşme noktaları çizgi şeklinde görülmektedir. Diğer taraftan aleminyum çaydanlığın bombeli yüzeyinin en uç kısımlarında yansıyan ışın etkisi de görülmektedir.

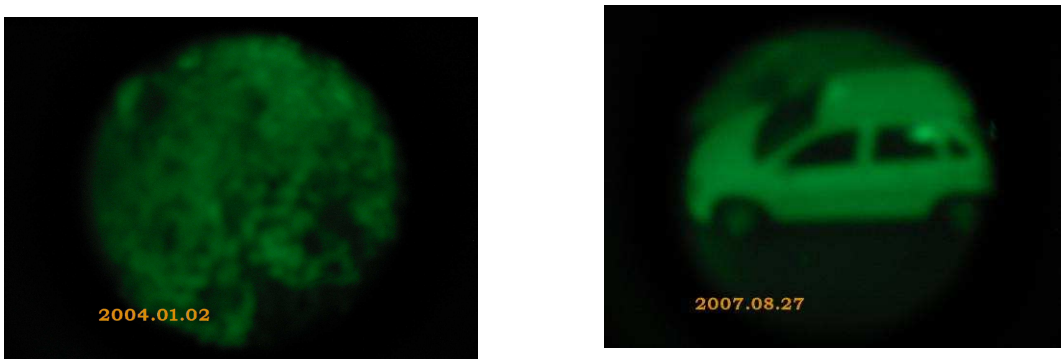



(a) (b)

Şekil 4.7. a. IR ışın kaynağı yok, görüntü de yoktur, b. IR kaynak var hedef algılanabiliyor,

Aktif algılamanın görüntüleme çalışmalarında uzaktan görüntü almaya yönelik denemeler yapılmış; ancak kayda değer bir sonuç vermemiştir. Yapılan incelemelerde bu sonucun aktif sistemin algılayıcı birimi olan GGC ünitesinin optik girişinden kaynaklandığı ve giriş optiğinin enerji toplamada ki sınırı sebebiyle, algılama biriminin objektif grubunun teleobjektif olmadıkça küçük cisimlerin uzaktan algılanmasında başarılı olunamayacağı görülmüştür. Diğer taraftan gerçeklenen aktif algılama sisteminin sınırlı da olsa dış ortam performansının ortaya konması adına şekil 4.8'deki görüntüler kaydedilmiştir. Farklı zamanlarda ve yerde alınan görüntülerde amaç IR yansıtmanın görüntülemeye olan etkisini görmektir. Şekil 4.8.a.'da görülen bir ağaç

hedeftir ve yaklaşık 20 m'den görüntülenmiştir. Burada görüldüğü üzere IR kaynağın yansımasında problem olduğundan kısmi bir görüntü alınabilmiştir. Oysa şekil 4.8.b.'de görülen duran araç da yaklaşık 20 m'den görüntülenmiş olmasına rağmen IR kaynak etkisini tam olarak göstermektedir. Yine dikkat çeken bir nokta araç üzerindeki uygun açının denk geldiği yansıma noktasında retro-reflektör etkisinin de görülüyor olmasıdır.




Şekil 4.8.a IR ışın kaynağı açık konumda hedef ağaçtan alınan görüntü, b. Park halinde bir otomobil

## 4.4 ICCD'nin SNR Hesaplamaları

ICCD'nin giriş penceresi olan fotokatot hem foton gürültüsü hem de karanlık gürültüsü üretir. Bu durumda fotokatodda oluşan gürültü Eşitlik (4.1) ile verilmektedir (Holst 1996).

$$n^2_{pc\text{-}çekim} = n^2_{katot} + n^2_{pc\ \text{-}karanlık} \qquad (4.1)$$

Burada; $n_{pc\text{-}çekim}$ = Yoğunlaştırılmış foton çekim gürültüsü (elektron cinsinden)

$n_{katot}$ = Yoğunlaştırılmış foton gürültüsü (elektron cinsinden)

$n_{pc\ \text{-}karanlık}$ = Yoğunlaştırılmış karanlık akım çekim gürültüsü (elektron cinsinden) verilmektedir. MCP bu gürültüyü sinyal olarak algıladığından kuvvetlendirip, fazlalık gürültüsünü (excess noise) de eklerse bu durumda; MCP'de oluşan gürültü;

$$n^2_{MCP} = K_{MCP} * G^2_{MCP}\ \ n^2_{pc\text{-}çekim} \qquad (4.2)$$

Burada; $n^2_{pc\text{-}çekim}$ değeri Eşitlik (4.1)'den yerine konursa;

$$n^2_{MCP} = K_{MCP} * G^2_{MCP} (n^2_{katot} + n^2_{pc\text{-}karanlık}) \quad (4.3)$$

olarak bulunur, burada; $n^2_{MCP}$ = Mikro kanal gürültüsü (elektron cinsinden), $G_{MCP}$ =Mikro kanal kazancı (sayısal), $K_{MCP}$ =Mikro kanal fazlalık gürültüsü (sayısal) bulunur. $K_{MCP}$ genellikle 1,8 alınır. Fakat bu değer fark voltajı (bias) ve SNR azaltılması ile değişir. Gürültü gücü fosfor ekranı tarafından fotonlara dönüştürülür. Böylece ekrandan gelen gürültü de hesaba katılır.

$$n^2_{ekran} = \eta^2_{ekran}\ n^2_{MCP} \quad (4.4)$$

$n_{ekran}$=: Yoğunlaştırılmış ekran gürültüsü (elektron cinsinden)

$\eta_{ekran}$ = Yoğunlaştırılmış sayısal ekran Quantum verimliliği

[ICCD için, KA (P20) fosfor ekran ve $\eta_{ekran}$ =190 foton (bir elektron için)]

$$n^2_{ekran} = (190)^2 [K_{MCP} * G^2_{MCP*} (n^2_{katot} + n^2_{pc\text{-}karanlık})] \quad (4.5)$$

Bu değere CCD sinyali ve CCD gürültüsü eklenerek elektronlara dönüştürülür.

$$n^2_{CCD} = \eta^2_{CCD} + n^2_{ekran} + n^2_{CCD\text{-}karanlık} + n^2_{zemin} + n^2_{PRNM} \quad (4.6)$$

Burada; $n_{CCD}$ : ICCD'de CCD gürültüsü (elektron cinsinden)

$\eta_{CCD}$ : CCD Quantum verimliliği genellikle % 25 olarak kabul edilmektedir.

$n_{CCD\text{-}karanlık}$ : Bir ICCD'de, karanlık akım CCD gürültüsü (elektron cinsinden)

$n_{zemin}$ : Zemin gürültüsü (elektron cinsinden)

$n_{PRNM}$ : doğrusal dağılmayan pozlanmaya tepki gürültüsü (elektron cinsinden)

Toplam gürültü Eşitlik (4.7) ile verilir.

$$n^2_{CCD} = \eta^2_{CCD*} \eta^2_{ekran} [K_{MCP} * G^2_{MCP} (n^2_{kat} + n^2_{pc\text{-}karn})] + n^2_{CCD\text{-}karn} + n^2_{zemin} + n^2_{PRNM} \quad (4.7)$$

Sonuç olarak; ICCD İçin SNR'ı işaret ve gürültü hesabının sonucunu olarak yazarsak;

$$SNR = \frac{\eta_{CCD} \cdot \eta_{ekran} \cdot G_{MCP} n_{katot}}{\sqrt{\eta^2_{CCD} \cdot \eta^2_{ekran} k_{MCP} \cdot G^2_{MCP} (n^2_{katot} + n^2_{pc-karanlk} + n^2_{ze\,min} + n^2_{PRNM})}} \quad (4.8)$$

Bulunur, bu formüle bazı yaklaşımlar yapabiliriz.

i.) Kazanç çok yüksek olduğunda (aktif algılamada), görüntü yoğunlaştırıcı gürültüsü CCD gürültüsüne biner. Bu durumda;

$$SNR = \frac{\eta_{CCD} \cdot \eta_{ekran} \cdot G_{MCP} n_{katot}}{\sqrt{\eta^2_{CCD} \cdot \eta^2_{ekran} k_{MCP} \cdot G^2_{MCP} (n^2_{katot} + n^2_{pc-karanlk})}} \tag{4.9}$$

$$SNR = \frac{\eta_{CCD} \cdot \eta_{ekran} \cdot G_{MCP} n_{katot}}{\eta_{CCD} \cdot \eta_{ekran} \cdot G_{MCP} \sqrt{k_{MCP} \cdot (n^2_{katot} + n^2_{pc-karanlk})}} \tag{4.10}$$

$$SNR = \frac{n_{katot}}{\sqrt{k_{MCP} \cdot (n^2_{katot} + n^2_{pc-karanlk})}} \tag{4.11}$$

Kazanç yükseldiğinde; SNR, GGC'nin kazancından ve CCD'nin quantum verimliliği karakteristiğinden bağımsız olur.

ii.) Orta derecede kazanç durumunda; CCD gürültüsü, GGC gürültüsünden daha büyük olur. Bu durumda SNR;

$$SNR = \frac{\eta_{CCD} \cdot \eta_{ekran} \cdot G_{MCP} n_{katot}}{\sqrt{n^2_{CCD-karanlik} + n^2_{zemin} + n^2_{PRNM}}} \tag{4.12}$$

Eşitlik 4.12'deki şekilde bulunur.

Aktif görüntülemede SNR'i CCD Kamera (Akita DC-4380) SNR'i ile karşılaştırırsak, ICCD standard kameraya nazaran daha düşük SNR göstermektedir. Bu şartlar altında ICCD'nin avantajı, aktif görüntüleme ile sağlanan foton akısının hesaplamalara yansımış olmasıdır. Tipik bir hesaplamada (Holst 1996); $G_{MCP}$ 317'den büyük olduğundan, (burada 2500 dür) ICCD'nin SNR değeri CCD'nin SNR değerinden büyük olmaktadır[11].

[11]Uygulamada $G_{MCP}$ binler mertebesindedir.

Bu sebeple; aktif bir ICCD SNR'i, herhangi CCD kamera ve herhangi bir görüntü yoğunlaştırıcı aygıtından her zaman daha iyidir (Moran 1997).

CCD'li bir cihazda en basit hali ile ;
Gürültü=$(\text{sinyal})^{1/2}$ olmaktadır. (4.13)

Gürültüde, Okuma gürültüsü ve Karanlık Akım gürültüsü de etkin olmaktadır. Bütün bu gürültü parametrelerini bir arada değerlendiren SNR Eşitlik 4.14 ile verilmektedir.

$$SNR = \frac{IQEt}{\sqrt{(IQEt + Ndt + Nr^2)}} \tag{4.14}$$

Eşitlik 4.14.'de; I : Foton akısı (fotons/piksel/s), QE: Kuantum verimliliği,
t : Entegrasyon (pozlanma) süresi (s), Nd: Karanlık akım (elektron/piksel/s),
Nr: Okuma gürültüsü (elektron) olarak verilmektedir.

Eşitlik 4.14 incelendiğinde; çok düşük ışık koşullarında, okuma gürültüsü foton gürültüsüne baskın olmakta ve görüntü verisi artık okuma gürültüsüne bağlı olmaktadır. ("*read-noise limited*.") Eğer entegrasyon süresi foton gürültüsünün hem karanlık akımını hem de okuma gürültüsünü bastıracak kadar çok yüksek tutulursa bu sefer de görüntü verisi artık foton gürültüsüne bağlı olmaktadır ("*photon limited* "). Bu sebeplerle; SNR'yi aktif olarak arttırmak; sinyalin kazancını yükseltilerek ortamdaki gürültünün bastırılması şeklinde görülebilmektedir.

### 4.5 IR kaynaklı ICCD ile IR ledli CCD'nin Mukayese Çalışması

Doktora kapsamında geliştirilen ICCD kamera ile standart güvenlik kamerasının karanlık ortamdaki performans mukayesesi deneysel çalışmasının amacı; karanlık ortamda değişik hedefler ile ölçüm yaparak ICCD kamera ile standart kızıl ötesi ledli güvenlik kamerasının görüntü kayıtlarını inceleyerek her iki sistemin kullanılabileceği alanlara ilişkin görüş oluşturmak ve ICCD ile yapılan çalışmalara bir farklı yaklaşım getirerek yönlendirilmiş aydınlatma ile anahtarlamanın önemine vurgu yapmaktır. Bu amaçla deneyde kullanılacak sistemler (ICCD kamera, kızılötesi ışın kaynağı, standart,

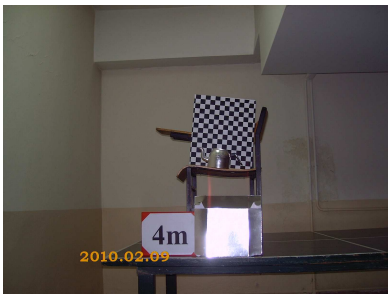
kızılötesi ledli CCD kamera, video, el tipi monitor ve değişik hedefler) hazırlanmış ve deney yeri olan Hacettepe Üniversitesi Beytepe Kampüsü Elektronik-Elektrik Mühendisliği Binası bu ölçüm için uygun olup olmadığı yönünde incelenerek; gece görüş cihazlarının görme sınır değeri olan $10^{-6}$ footcandle[12] değerinin altında bir ışık seviyesinde olduğu, pasif gece görüş cihazı ile görüntü alınamadığı tespit edilmiştir.




Bu ölçüm alanı, Türkiye'deki en uzun gece görüş karanlık odası olarak, bu tip bir ölçümde ilk defa kullanılmıştır. ( Özel ışık kontrollü karanlık odaların boyu yaklaşık 15 m dir).

Şekil 4.9 Ölçümlerin yapıldığı koridor, koridorun boyu yaklaşık 40 m dir.

Ölçümler yapılırken kullanılan hedefler bulunduğu yerde sabit tutulmuş, kameralar 4 m, 10 m, 20 m, 30 m ve 40 m mesafelere götürülerek görüntü kaydı alınmıştır.




Şekil 4.10 Hedef olarak kullanılan damalı tahta ve metal malzeme.

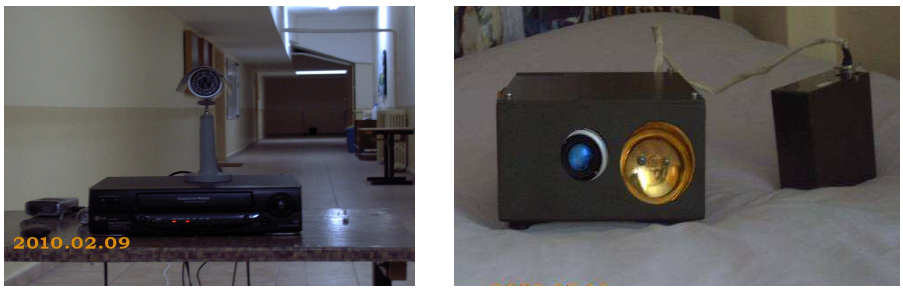
Deneyin yapıldığı ortamda hiç bir ışık/ışıma kaynağı yokken, ortamda gece görüş cihazı ile görüntü alınamamıştır. Çıplak göz ile bakıldığında ise yan yana duran iki insanın bile birbirini göremediği bir karanlık ortam olduğu gözlenmiştir. Bu durum şekil 4.11 ile görülmektedir.

[12] Bu değer 06 Kasım 1989 tarihli "MIL-I-49453 Image Intensifier Assembly 18 mm Microchannel wafer MX-10130 Military Specification" adlı ABD askeri şartnamesinden alınmıştır.



Şekil 4.11 Her iki kamerada da; ortamda  hiç ışık/ışıma yokken, karanlık görüntü elde edilmiştir. Bu durumun tespiti amacıyla CCD kamera ile yandaki görüntü çekilmiştir.

IR kaynaklı ICCD ile IR ledli CCD'nin Mukayese Çalışması için alınan 36 adet kızıl ötesi ledi bulunan standart güvenlik kamerası (1/3 Sony CCD'li Balitech Model BL-659D) şekil 4.12.a.'da ve yapılan ICCD kameralı aktif algılama cihazı Şekil 4.12.b.'de görülmektedir.



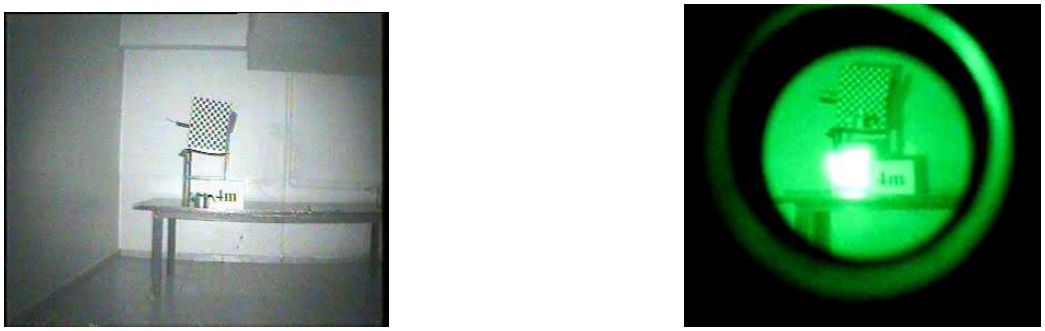

(a) (b)

Şekil 4.12.a. IR ledli standart güvenlik kamerası b. ICCD kamera IR kaynak

Deney yapılırken kızıl ötesi ledli güvenlik kamerası ile yapılan kayıtlar önce video kasedine kaydedilmiş, daha sonra sayısal ortama çevrilerek, ICCD kamera ile yapılan görüntü kaydı ile mukayese edilmiştir. Her bir ölçüm için standart kızıl ötesi ledli güvenlik kamerasının görüntüsü ilgili şeklin a.sında ve ICCD kamera görüntüsü ise ilgili şeklin b.sinde verilmektedir.

Yapılan ölçümler;

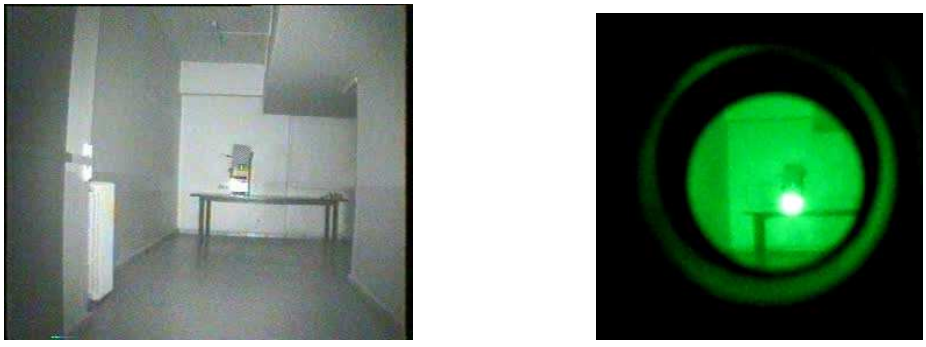
Çalışmalar esnasında  sırasıyla 4 m, 10 m, 20 m, 30 m ve 40 m'den ölçümler yapılmıştır. Sonuçları aşağıda verilen görüntülerde standart kızıl ötesi ledli güvenlik kamerasındaki led sayısı ICCD'nin aydınlatılmasında kullanılan ledlerin 4 katı fazladır.




(a) (b)

Şekil 4.13.a 4 m için IR ledli standart güvenlik kamerası b. 4 m için ICCD kamera IR kaynak görüntüsü

Yapılan ilk görüntülemede hedef olarak bir geniş masanın üzerine konmuş, yazı sandalyesinin üstüne yerleştirilmiş damalı tahta hedef kullanılmıştır. Aktif algılamanın farkını görmek açısından da üzeri metal kaplamalı bir malzeme ile aleminyum çaydanlık kullanılmıştır. Şekil 4.13. her iki kameranın 4 m yakın mesafe görüntüsü mukayese amacıyla alınmıştır, büyütmesi olmayan ICCD için en optimum menzil, yukarıdaki diğer görüntüleme çalışmalarının da yapıldığı 4-6 m aralığıdır. Bu menzilde hedef olarak seçilen malzemeler her iki kamera tarafından da algılanmakta olduğu görülmektedir. Ancak ICCD'li kameranın metal plakayı ışın kaynağı gibi göstermesi GGC'nin anahtarlama avantajı ile sağlanmaktadır. Kameraların menzile bağlı performansının görülmesi açısından hedef sabit tutularak aynı hedef kameraların menzili 10 m'ye çekilerek görüntülenmiştir. Alınan görüntüler şekil 4.14'de görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.14.a 10 m için IR ledli standart güvenlik kamerası b. 10 m için ICCD kamera IR kaynak görüntüsü

Şekil 14'de görülen; 10 m için hedef algılama görüntüleri için; dama hedefinin her iki kamera tarafından da görüntülenmekte olduğu ancak 4 m deki görüntü açıklık ve netliğinin bu görüntüde olmadığı görülmektedir. Metal çaydanlık malzemesi net olarak gözükmemektedir; ancak tamamen geri yansıtma özellikli malzeme her iki görüntüde de net olarak gözükmektedir. Her iki görüntüde de hedefin bulunduğu masa, arka plandaki duvar kenarları vb. detaylar görülebilmektedir.

Kameraların 20 m'ye çekilerek alınan görüntüler şekil 4.15'de görülmektedir. 20 m için; Dama hedefi her iki görüntüde de görülmekte ancak ayırt etme gücü 10 m ye göre daha zayıflamış görülmektedir. Metal çaydanlık malzeme her iki görüntüde de gözükmemektedir. Tamamen geri yansıtma özellikli malzemenin (Refro-reflektor plaka) gözükmesi ise kızılötesi ledli güvenlik kamerası ile sönük olarak gözükürken ICCD'li kameranın görüntüsünde daha nettir. Her iki görüntüde de hedefin bulunduğu masa, koridor, arka plandaki duvar kenarları vb. detaylar görülebilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.15.a 20 m için IR ledli standart güvenlik kamerası b. 20 m için ICCD kamera IR kaynak görüntüsü

Benzer olarak kameraların 30 m'ye çekilerek alınan görüntüler Şekil 4.16'da görülmektedir. 30 m için görüntüler değerlendirildiğinde; her iki görüntüde de Dama hedefi görülmemektedir. Tamamen geri yansıtma özellikli malzemenin (Refro-reflektor plaka) gözükmesi ise her iki görüntüde de zayıf bir ışın kaynağı olarak gözükmektedir. Kızılötesi ledli güvenlik kamerası ile alınan görüntüde koridor net olarak görünürken, ICCD'li kameranın görüntüsünde bu netlik gözükmemektedir[13].

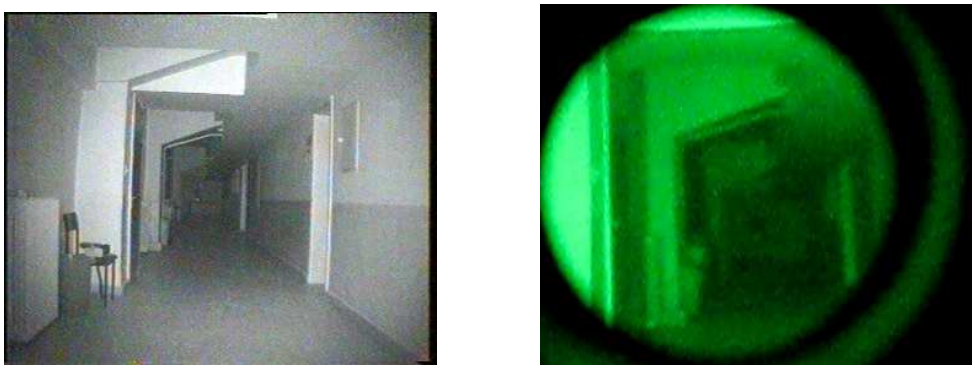
[13] Standart güvenlik kameranın katalog bilgisi 25 m dir.



(a) (b)

Şekil 4.16.a 30 m için IR ledli standart güvenlik kamerası b. 30 m için ICCD kamera IR kaynak görüntüsü

Son olarak, ölçüm yapılan koridorun en uç noktaları arasından, yaklaşık 40 m için görüntüler alınmıştır; alınan görüntüler şekil 4.17'de sunulmuştur. Her iki görüntüde de dama hedefi ve tamamen geri yansıtma özellikli malzeme (Refro-reflektor plaka) görülmemektedir. Ancak yan duvarlardan yansıyan ışıma sayesinde koridar kenarları biraz gözükmekte burada yine Kızılötesi ledli güvenlik kamerasının görüntüsü ICCD'li kameranın görüntüsünde subjektif değerlendirmeme göre daha nettir.



(a) (b)

Şekil 4.17.a 40 m için IR ledli standart güvenlik kamerası b. 40 m için ICCD kamera IR kaynak görüntüsü

Her iki aktif görüntüleme sisteminin 20 m civarında rahatlıkla kullanılabileceğini, daha ileri mesafelerde kullanılabilmeleri için ise giriş optik sistemine ihtiyaç olduğu ve ICCD'nin alt sistemi GGC'nin kazancı sayesinde kendisinden 4 kat fazla Kızılötesi ledle aydınlatılan CCD kamera ile karanlık ortamlarda bir noktaya kadar eşit görüntü alabildiği, bir noktadan sonra ise daha fazla kızılötesi ledli aydınlatmanın avantajı

görülmüştür. Bir başka dikkat çeken nokta ise; tamamen geri yansıtma özellikli malzeme (Refro-reflektor plaka)'nin ICCD'li aktif görüntülemede uygun mesafelerde çok net olarak görülmesidir. Bütün bu veriler aktif aydınlatmanın gün geçtikçe daha çok uygulama alanı bulacağını ve özellikle güvenlik kameraları görüntü kaydedebilsin diye sürekli aydınlatılan bölgelerin kısmen aydınlatılmasının yeterli olabileceği durumlarda elektrik enerjisinden de tasarruf sağlayacak uygulamaları olabileceği değerlendirilmektedir.

# 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan çalışma kapsamında anahtarlamalı aktif algılamaya uygun bir ICCD gerçekleştirilerek, hiç ışık olmayan ortamda, termal kamera hariç, görüntü alınabilmiş, kayıt yapılmıştır. Aktif algılama yapmaya uygun olarak ICCD ile uyumlu çalışacak şekilde bir IR ışıma kaynağı yapılmış ve ICCD'ye entegre edilerek aktif görüntüleme cihazı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hazır ürün olarak satın alınabilen IR ledli CCD güvenlik kamerası da alınarak dördüncü bölümünde açıklanan deneysel çalışmalarda anahtarlamalı aktif görüntüleme ile mukayese amacıyla kullanılmıştır.

Aktif görüntüleme ile hem IR kaynaklı ICCD'nin hem de IR ledli CCD'nin ışık olmayan ortamlarda görüntü alamama dezavantajını yendikleri mukayeseli olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda IR kaynak olmadığı zaman, ışık olmayan ortamda CCD ve GGC ile görüntü alınamadığı da gösterilmiştir. Anahtarlamanın getirdiği avantaj ile ICCD'nin yönlendirilmiş (laser veya IR kaynak) yüksek enerjili aydınlatmanın yapıldığı ortamda da doyuma gitmeden çalışabildiği gösterilmiştir. Diğer taraftan, her bir ilave optik sistemin alınan görüntüyü belirli bir oranda bozduğu; ancak görüntü alma tekniği açısından sağladığı faydalar sebebiyle kullanılma mecburiyeti olan alt sistemlerin de vazgeçilmez olduğu, ayrıca aktif bir kaynak (laser veya IR) kullanılarak bu bozulmanın bir noktaya kadar aşılabildiği gösterilmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmanın teorik boyutunda; ICCD'yi oluşturan ve MTF analizi açısından en kritik alt parçası sayılan GGC MTF'i için geliştirilen regülasyon katsayısı sayesinde, GGC'nin en yaygın kullanılan analitik MTF'i regülasyonsuz hali ile ölçüm sonuçlarına göre yaklaşık % 20 hata verirken, bu hata oranı % 3'e çekilmiş ve bu alt sistem MTF iyileştirmesinin ICCD'nin analitik MTF'ine şekil 3.16'dan görüleceği üzere % 6 iyileştirme olarak yansıyarak örnek ICCD MTF'ine daha yakın sonuç verdiği gösterilmiştir. Böylece analitik ICCD MTF'inin ölçüm değerlerine daha yakın bulunabileceği gösterilerek, ilerde ICCD ile ilgili gerçekleştirilebilecek modelleme ve performans simülasyonlarının da pratik ölçümlere daha az ihtiyaç duyarak, gece görüş sistemlerinin de görüş simülasyon tekniklerine katılacağı ve gece görüş simülasyonları üzerinde daha fazla araştırma yapılabileceği belirlenmiştir (Chao 2009, Lei 2009).

Böylece; literatürde GGC MTF'i için yaygın olarak kullanılan Gaussian MTF yerine bu çalışmada önerilen Gaussian + logaritmik analitik formülasyonun hem GGC'nin MTF'ni iyileştirdiği hem de bu sonucun ICCD MTF'inin de analitik olarak iyileştirdiği gösterilmiştir.

Yapılan ICCD'nin SNR analizinde, ICCD'nin SNR oranının sinyalin kare kökü ile doğru orantılı olması sebebiyle, düşük ışık seviyelerine göre oldukça yüksek foton gücü sağlayan IR kaynağın anahtarlama yapmadan sürekli olarak açık kaldığı durumda sinyal gücünü aşırı yükselttiği, bunun ise ICCD'de doyuma yol açtığı; bunun yanında sinyal gücünün optimizasyonun sağlanarak şekil 4.6'da gösterildiği gibi, ışık olmayan ortama rağmen anlaşılabilir görüntülerin elde edilebileceği gösterilmektedir.

Tez çalışması ile; CCD, GGC, ICCD ve IR kaynak konuları bir arada değerlendirilerek; ışık olmayan ortamda, termal kamera dışında bir başka sistem ile de görüntü alınabildiği, ancak aktif sistem olarak adlandırılan bu sistemin kendi konumunu belli etmeyen termal sisteme göre yerini belli etmesi nedeniyle askeri açıdan dezavantajı olmakla birlikte; maliyet olarak termal kameraya kıyasla daha ucuz olduğu ve bu sebeple sivil amaçlı kullanımının yaygınlaşmakta olduğu değerlendirilmektedir. Bu şekilde; ortam aydınlığına bağlı olmayan ve ışık olmayan ortamda termal görüş cihazları haricinde de görüntüleme sistemlerinin başarılabileceği de gösterilmiştir.

Yapılan literatür taraması ile; konu ile ilgili makale ve patentlerin son yıllarda (2005-2010 aralığı için) bir çok ülkede gelişerek sürdüğü ve özellikle bulanık su altında görüntü alma ve araç sürücülerinin standart yol şeritlerinden yararlanarak şeridi otomatik takip etme ve/veya şeritten çıkma halinde uyarı veren aktif görüntüleme sistemleri, sahil güvenlik uygulamalarına ilişkin örnek çalışmalar olduğu da tespit edilmiştir. Açık literatürde mevcut örnek çalışmalardan bazıları Ek 8'de sunulmuştur.

Sonuç olarak; şekil 2.1'de görülen kısıtlar ile insan gözünün oldukça sınırlı görme yeteneği olduğunu, ancak insanın yeni teknikler geliştirerek bu tahditleri aştığı ve kendisini etkileyen her türlü çevresel gelişmeyi veya tehdidi algılayabilmek ve kaydetmek için pasif gece görüşten, termal gece görüşe, aktif sistemlere ve anahtarlamalı aktif sistemlere kadar bu sistemlerin simülatörleri dahil pek çok

uygulamanın bir arada geliştiği de bir gerçektir. (Vigil 1996, Larochelle ve Mathie 1999, Ientilucci 2000, Monnin 2006, Patwardhan 2006, Steinvall 2006,Yoshida 2007, Jin 2007, Chao 2009, Bo 2010 ).

Şekil 2.1'deki yatay eksen ortam ışık değerlerini logaritmik olarak göstermektedir. Buradaki normal ışık dağılımı küresel ve çok bantlı olduğundan, IR kaynak ile aydınlatıldığı şekilde ani ve güçlü olamamaktadır. Şekil 4.1'de görülen IR kaynak ile aydınlatma olduğunda ise anahtarlamanın da sağladığı yüksek gürültü bağışıklığı sayesinde ICCD'nin giriş penceresi sayılan fotokatod yüksek bir verimlilik ile kullanılabilmektedir. Karanlık durumunu ışığın olmaması hali diye tanımlarsak, aktif görüntüleme yöntemini kısaca; gözle görülmeyen flaş ile karanlık ortamın baskın olduğu bir fotoğraf çerçevesinde bir anlık aydınlatma penceresi açarak istenen bilginin alınması şeklinde tanımlayabiliriz. Bunu sağlayan en önemli etken ICCD'nin SNR oranının, ortamdaki foton sayısını anahtarlamalı IR ışınımı ile yükselterek hedefin algılanmasını sağlayacak seviyeye getirilmesidir. Böylece ICCD cihazının ortamdaki ışık seviyesine bağlı başarı düzeyi ışık koşullarından bağımsız hale getirilmektedir.

Tez kapsamında prototip olarak geliştirilen ve kısa mesafeler için ortamdaki ışık seviyesinden bağımsız, termal kamera haricinde de görüntüleme sisteminin geliştirilebileceği gösterildiğinden; gelecekte bu çalışmanın alan uygulamalarına yönelik daha güçlü bir aydınlatma kaynağı ve odak uzaklığı ayarlanabilir bir teleobjektif grubu ile bütünleşik bir ICCD yardımı ve manuel olarak yapılan anahtarlamanın yerine bilgisayar destekli ve ICCD ile IR kaynak senkronizasyonunu sağlayacak bir şekilde geliştirilecek daha kapsamlı bir sistem ile uzak (200-300 m) hedeflerin de görüntü kayıtlarının sürekli kaydedilebileceği ve istenen periyotlarla bir merkezi noktaya aktarılabileceği bir anahtarlamalı aktif sistemin yapılması planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR


Anonim 1989. "MIL-I-49453 (CR) 6 November 1989" ABD standardı.

Anonim, 1993. IR/Elektro-Optik Systems Handbook Volume 4 Infrared Imaging System Testing, SPIE press, page 232-233.

Anonim, 1993. Photonics Design and Applications Handbook, Laurin Publishing Company, page H70.

Anonymous 2009 web sitesi http://www.fen-net.de/walter.preiss/index.html Erişim Tarihi:08.05.2009

Anonymous 2009 web sitesi http://www.fen-net.de/walter.preiss/e/wp_frame.html Erişim Tarihi:08.05.2009

Anonymous 2010 web sitesi http://www.valcartier.drdc.rddc.sc.ca.index.html Erişim Tarihi:04.04.2010

Anonymous 2010 web sitesi http://www.stanfordcomputer.com.frame.html Erişim Tarihi:04.04.2010

Anonymous 2010 web sitesi http://www.andor-tech.com.frame.html Erişim Tarihi:04.04.2010

Abbott, F. 1980, "The Theory of MTF" MTF Measurement Equipment The Optical Industry and Systems Purchasing Directory, pp 639-651.

Beşikçi, C. 2008 "EE 755 Infrared Devices and Systems Lecture Notes Fall 2008-2009" METU-Ankara.

Biberman, L.M. (Editor) and Bender E.J.2000"Ch.5: Present Image Intensifier Tube Structures", Electro-Optical Imaging: Systems Performance and Modeling SPIE Press, ISBN 0-8194-3999-1, Oct. 2000, sayfa: (5-41 5-45).

Biberman, L.M. (Editor) and Hall J.A 2000."Ch.6: Calibration and Characterization of Image Intensifiers" Electro-Optical Imaging: Systems Performance and Modeling SPIE Press, ISBN 0-8194-3999-1.

Biberman, L.M. (Editor) and Schnitzler, A. 2000 "Ch.4: Early Image Intensifier Tube Structures" Electro-Optical Imaging: Systems Performance and Modeling SPIE Press, ISBN 0-8194-3999-1.

Bo Fu, Kecheng, Y. Jionghui, R. Min, X. 2010,.“Analysis of MCP gain selection for underwater range-gated imaging applications based on ICCD”, J.of Modern Optics Vol:57, March 2010,pp:408-417

Bonnier, D. and Larochelle, V. "A Range-Gated Active Imaging System For Search and Rescue Surveillance Operations", Infrared technology and Applications XXII, SPIE Vol. 2744, Orlondo, 8-12 April 1996.

Boreman, G. D. 1998. “Basic electro – optics for electrical engineers. tutorial texts in optical engineering” volume TT31 SPIE opt. eng. press, sayfa 23, Washington.

Boreman, G.D. 2001 “Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems” Tutorial Texts in Optical Engineer Volume TT52 SPIE Press Belligham, WA-USA 98227-0010, ISBN : 0-8194-4143-0, pp 85-101.

Bosch, L.A, 2000 “ Image intensifier tube performance is what matters”, SPIE, Vol.4128, pp:65-78

Chao, C. Yang, H.R. Li, G.P. Wu, L. et al. 2009, “Simulation of underwater objects imaging through rough sea surface based airborne laser range-gated system” SPIE, Vol: 7382 , 73825A-1/8

Gül, N. 2003 “ CCD (Charge Coupled Device ) Uygulamaları” Nisan 2003, Ankara Üniversitesi.

Gül, N. 2003 “GYT’lü CCD Cihazının Modülasyon Transfer Fonksiyonunun Belirlenmesi ve Sistemin Alt Parametrelerinin Hesaplanması” Y.Lis. Tezi Tem. 2003, Ankara Ünv.

Gül, N. and Efe, M. 2003 “Comparation of Human eye, ICCD, CCD and Night Vision Devices and MTFs Improvement.” 5th National, Electro-Optical and Photonics W.Meeting (Unpublished), 12 Dec. 2003, METU- Ankara-Turkey.

Gül, N. 2007 “Aktif Gece Görüntüleme Sistemlerinin Uygulamaları”, Kasım 2007, Ankara Üniversitesi- Ankara-Turkey.

Gül, N. Efe, M. and Larochelle, V. 2008 “Development Of The OTF For Image Intensified CCD, Particularly With OTF Of Image Intensifier Tubes” IEEE 25th Conv.of Electr. & Electr. Eng. in Israel (IEEEI 2008), Proc.Letters,1-4244-2482-5, pp. 036-040

Gül, N. ve Efe, M. 2010. "Development of a Better Analytical Modulation Transfer Function for Image Intensified CCDs Through Modifying MTF of the Image Intensifier Tube" Turk J. Elec.& Comp. Sci, Vol.18, No.1,2010 pp.71-81

Holst, G.C. 1995. Electro-optical imaging system performance. JCD publishing , 2932 Cove Trail, Winter Park, FL 32789, sayfa 65.

Holst, G.C. 1996 "System MTF", CCD Array, Cameras and Display ICO Publishing, 2932 Cove Trail Winter Park, FL 32789, sayfa 269.

Holst, G.C.1998 "Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems JCD Publishing, 2932 Cove Trail Winter Park, FL 32789, sayfa 4-7.

Howe, J.D. 1993 Electro-optical Imaging System Performance Prediction, IR-EO System Hand book Volume 4, pp:69

Ientilucci, E.J. "Synthetic Simulation and Modeling of ICCD, Imaging Science in the College of Science (RIT), 2000, New York, USA.

Koçer, H. 2006 "Kızılötesi Dedektör Teknolojileri" Ocak 2006 Elektro-Optik Sistemler Bakım Merkezi Md.lüğü Yenikent Ankara (üniversitelere de yayımlanmıştır).

Larochelle, V. Mathie, P. and Simard, J.R. "Two Generation of Canadian Active Imaging Systems; ALBEDOS and ELVISS." Aerosense Infrared Technology and Applications XXV, SPIE 229-243, Orlondo FL. 1999.

Lei, Wu. 2009 "Modeling and simulation of range-gated underwater laser imaging systems" SPIE, Vol: 7382 , 73825B,

Li, L. Gao, Z. 2005 "Resolution Simulating Measurement Set-up for Range-gated Imaging System", Acta Photonica Sinica, V 34, N 2 February 2005 Chinese Optical Society, ISBN 1004-4213 sayfa: 165-168.

Llyold, J.M. 1982 "Thermal Imaging Systems" Plenium Press Newyork USA pp:18-30.

Jin, W. Cao, F. Wang X. Liu, G. 2007 "Range-gated underwater laser imaging system based on intensified gate imaging technology"; Proc. of SPIE-v 6621, Int.Symp. on Photo.Det. and Imaging sep 9-12 2007,

Monnin, David et al. 2007 "A 3D outdoor scene scanner based on a night-vision range-gated active imaging system", 3DPVT 2006, 2007, p 938-945, ISBN-10:0769528252.

Moran, S.E. Ulich, B.L. Elkins, W.P. et al 1997, "Intensified CCD (ICCD) dynamic range and noise performance" SPIE, Vol.12, 3173, pp:430-457

Mukund, A. Robert, M. Bunch, R. Richard, J.H. 1993 et al 1993 “Veiling Glare Measurements in the Image Intensifier ” Optical Engineering December 1993 Volume 32 Number 12 ISSN : 0091-3286 SPIE pp:3234-3236.

Patwardhan, Sachin V. et al: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology-Proceeding, EMBS’06, 2006, p 2675-2678 Aug 30-Sep 03 2006 New York, USA, ISBN-10:1424400325.

Rogalski, A. 1995 “Ch.6 Charge Transfer Devices” Infrared Foton Detectors Institue of Technical Physics WAT Warsaw TA1570 15433 pp:99-144, SPIE.

Seyrafi, K. 1985. “Electro-Optical System Analysis” E-O Research Company co. L.A. USA , sayfa 189.

Steinvall, O. Andersson, P. Elmquist, M. 2006 “Image quality for range-gated systems during different ranges atmospheric conditions” Proceeding of SPIE- v 6396, Stockholm, Sweden, p 639607

Subbarao, M. 1993, “Optical Transfer Function (OTF) and Spatial Frequency Responce Effect” Optical Engineering December 1993 Volume 32 Number 11 ISSN : 0091-3286 SPIE pp:2824-2825.

Vigil, A.E. 1996 "An Update on Low-Light-Level Camera Technology for Underwater Applications" Remote Ocean Systems, 5131 Santa Fe Street San Diego, California 92109-1613 USA, pp 1157-1167

Wang, X. Jin, W.Q. Gao, Z.Y. Wang, Z.H. Bai, T.Z. 2006 “Research on digittaly integrated test system for performance evaluation of image intensified CCD” SPIE, Vol:6150 .

Williams, G.M. and Morley, M.B. 1995 "How to Capture Low- Light-Level Images without Intensifiers" Laser Focus World September, Penwell publication pp 129-136.

Wolfe L.W.1996. “Introduction to Infrared System Design" SPIE Optical Eng.Volume TT24,

Yoshida, H. Uemura, K. Kenji, K.I. 2007 “Visual observation and analysis of hydrodynamic structure of water jet in application to jet grouting” 2007 Proceeding of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conf., ASME, FEDSM , p 1891-1897, San Diego, CA, USA ISBN-10:0791842886

# EKLER

**EK 1 Kanada ALBEDOS Projesi Özellikleri ve Proje Katılım Mektubu**

**EK 2 5. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalışma Toplantısı**

**EK 3 ICCD Görüntü Yoğunlaştırma Tüpü Güç Besleme Kontrol Devresi**

**EK 4 Kızılötesi IR Kaynak Devresi**

**EK 5 OD 669 Kızılötesi IR Diyot**

**EK 6 TJEECS'de Yayımlanan Makale**

**EK 7 Çalışmalarda Kullanılan Cihaz ve Özellikleri**

**EK 8 Aktif Görüntü Algılamaya ve Uygulama Örneği**

Ek 1 Kanada ALBEDOS Projesi Özellikleri ve Proje Katılım Mektubu




# ALBEDOS
# An Airborne Active Imaging System

- Operation with no ambient light.
- Excellent backscatter rejection.
- Applicable to search and surveillance roles.
- Immune to blooming effects.

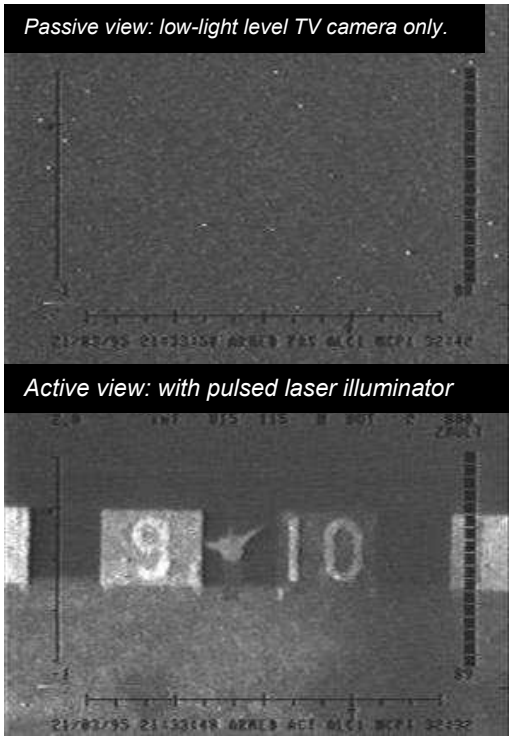
## Seeing under Difficult Conditions

DRDC Valcartier's Airborne Laser-Based Enhanced Detection and Observation System, or ALBEDOS, demonstrates an innovative electro-optic concept — active range-gated imagery — that can overcome many of the limitations of present-day search and surveillance equipment.

Search and rescue operations must frequently be carried out at night, often under very unfavourable weather conditions when even the most sensitive low-light level television system is blinded by insufficient light, poor atmospheric transmission or heavy backscatter from fog or snow and when infrared imaging systems are limited by low temperature contrast. ALBEDOS combines a pulsed near-infrared light source with a gated, intensified CCD camera sensor to enable detection and identification and to provide range information during both day and night, in virtually all weather conditions. A helicopter-borne implementation of the concept has been successfully demonstrated.

The ALBEDOS demonstrator comprises a solid-state, pulse-driven laser diode illuminator whose angle of coverage can be varied to suit the situation, and a low-light level CCD television camera equipped with an image intensification cell that is gated "on" and "off" by a pulsed power supply. An illuminating pulse from the laser, sent while the television camera is switched off, travels through the atmosphere towards the suspected target. Backscatter from this pulse, which would in many circumstances overload a conven tional viewing system, is ignored by the "off" camera. At exactly twice the time taken by the illuminating pulse to reach the range to be viewed, the image intensification cell is switched "on" briefly, allowing reflected light origi-nating at that range to be collected. This process is repeated 500 times per image frame.

The viewing range and the depth of this range are controlled by varying the timing and duration of the "on" signal. The camera may also be used in its conventional passive mode when conditions permit.




*An ALBEDOS trial scene, at night in overcast conditions, with a target at 900 m. The "passive" view represents the performance of typical present-day low-light level camera systems.*

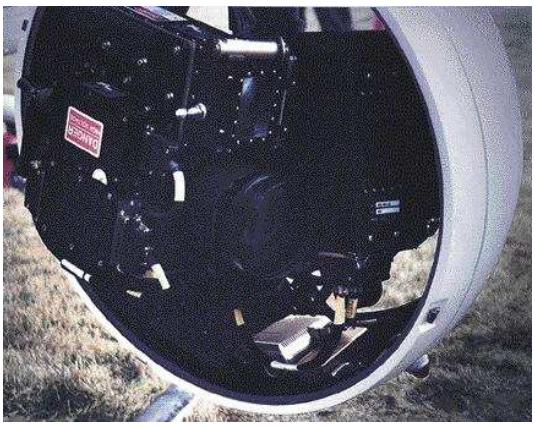
# ALBEDOS
# An Airborne Active Imaging System

## Characteristics

The prototype ALBEDOS illuminator provides 807 nm wavelength pulses from 100 ns to 2 μs in length, at a peak power higher than 450 W (maximum average power is 10 W). The beamwidth is either 2 or 10 degrees. The CCD camera has a resolution of 480X750 pixels and provides spectral coverage from 550 to 900 nm. It is equipped with a 16.5-400 mm f/2.8-3.9 lens with a 2X extender. The system operates over a scene illuminance
range of 100 to 10-7 lux, at ranges from 15 to 9,000 m, with a depth of field selectable from 15 to 2,000 m.

## A Cooperative Effort

ALBEDOS is another example of a project pursued jointly by DRDC Valcartier and other Canadian organizations. Trials of the initial DRDC Valcartier concept were held with the help of other DND agencies. Further development was sponsored by the National Secretariat for Search and Rescue, and the prototype was produced by Wescam, Inc. and the NOI of Quebec. Flight trials were organized in collaboration with the Flight Research Laboratory of the National Research Council





## For more information

**Project Leader**
Phone: (418) 844-4000 ext.: 4360 Fax: (418) 844-4511
Email: collabo-valcartier@drdc-rddc.gc.ca
**Defence R&D Canada – Valcartier**
2459 Pie-XI Blvd North, Val-Belair, Quebec G3J 1X5
Phone: (418) 844-4000 Fax: (418) 844-4635
collabo-valcartier@drdc-rddc.gc.ca
www.valcartier.drdc-rddc.gc.ca

Defence Research and Development Canada | Recherche et développement pour la défense Canada

Canada

Défense nationale | National Defence
Centre de recherches pour la défense Valcartier | Defence Research Establishment Valcartier

2459, boul. Pie-XI Nord
Val-Bélair QC G3J 1X5
CANADA

18 August 1997

Sir,

This letter is to confirm that Capt. Nebi Gül from Turkey has worked at the Canadian Defence Research Establishment Valcartier (DREV) between August 1996 and August 1997 (one full-year period). He was attached to the Active Systems for Surveillance and Target Acquisition (ASSTA) Section and more specifically involved in the ALBEDOS active imaging system project. ALBEDOS is an acronym for Airborne Laser-Based Enhanced Detection and Observation System and is based on a low-light-level TV (LLLTV) camera coupled to an infrared laser diode array illuminator. ALBEDOS enhances the general surveillance capability under degraded weather conditions and in low background illumination. The system has been successfully tested in various scenarios.

Mr. Gül's work was to develop an unique modelization program for active imaging. He was dealing with a relatively new concept for which the theory and all the mathematics are not founded in textbooks. Consequently, extensive research was required to start the project. This program, when completed, will be very useful to interpret results obtained from ALBEDOS during trials, to simulate operation of the system in various tactical scenarios and conditions, to explore the capabilities of active imaging and, finally, to stress out possible improvements to the system.

Mr. Gül has completed his work in a very satisfactory manner. He was enthusiastic and autonomous. He was well-organized and effectively used his knowledge and expertise in electro-optical systems. He is very conscientious and has done a good job.

Vincent Larochelle
Group Leader/Laser Sensors
Active Systems for Surveillance and
Target Acquisition Section
for Director General, DREV

Canada

EK 2 5. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalışma Toplantısı
12 Aralık 2003, ODTÜ, Ankara

5, Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalışma
Toplantısı 12 Aralık 2003, ODTÜ, Ankara

# ÖZET

**Nebi GÜL[1], Murat EFE[1]**

'Ankara Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara 06510

## İNSAN GÖZÜ, ICCD, CCD KAMERA ve GECE GÖRÜŞ CİHAZLARININ KIYASLANMASI VE MTF İYİLEŞTİRMESİ

Bu çalışmada; monoküler gece görüş cihazı ve CCD kamera kullanılarak ; bir adet görüntü yoğunlaştıncı tüplü CCD kamera-ICCD; gerçekleştirilmiştir. Gece Görüş Cihazının CCD kameraya adaptasyonu için normal bir mercek kullanılmış ve görüntüyü almak için el tipi LCD monitör kullanılmıştır.

ICCD'nin testi için karanlık test odası kullanılmış, gerekli ölçümler insan hatalarını azaltmak amacıyla 5 değişik teknisyen tarafından yapılmıştır. ICCD'nin ayırma gücü sonuçlarım mukayese edebilmek amacıyla aynı koşullar altında gece görüş cihazı ve CCD kamera da test edilmiştir. Söz konusu cihazların parametrelerinin ölçülebilmesi için sistemin, çizgi çifti/mm veya devir/mradyan ile ifade edilen uzaysal frekansa tepkisini gösteren Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF) analiz edilmektedir.

Bu çalışmada MTF konusu ayrıntılı olarak nicelenerek gece görüş tüpü için analitik MTF formül regüîasyonu geliştirilmiş ve ölçüm değerlerine çok yakın(%3 'ün altında ortalama hata) değerler elde edilebilmiştir. Elde edilen sonuçlar 25 çizgi çifti/mm için kabul edilebilir bir doğruluk seviyesinde olduğu tespit edilmiş, bu frekansın Üzerinde.ise regülasyonun uymadığı görülmüştür. Bu çalışmada frekans sının 25 çizgi çifti/mm yeterli görüldüğünden anılan uygunsuzluk değerlendirme dışında tutulmuştur.

Her ikisi de düşük ışık şartlarında kullanılabilen CCD ve Gece Görüş Cihazı (GGC) bir mercekli adaptör yardımı ile birbirine uyumlandınlarak birleşik olarak kullanılabilen görüntü yoğunlaştıncı tüplü CCD-ICCD kamera elde edilmiş; CCD, GGC ve ICCD'nin birbirine göre üstünlükleri alınan ölçüm sonuçlarına bağlı olarak mukayese edilmektedir.

Düşük ışık seviyesi koşullan altında Gece Görüş Cihazı, CCD ve ICCD'nin ayırma gücünün mukayesesi sonrasında; gece görüş cihazının en iyi ayırma gücünü verdiği ancak tek basma monitörize edilemediği, CCD'nin ise smırh düşük ışık seviyesi koşullannda iyi olduğu ancak bütün düşük ışık seviyelerinde görüntü veremediği ve son olarak ICCD'nin gece görüş cihazının performansına göre biraz görüntü kalitesinin düşmesine rağmen bütün düşük ışık seviyeleri koşullarında dahi görüntü verebildiği tespit edilmiştir

Anahtar Kelimeler: ICCD, CCD, ICCD, Modülasyon transfer fonksiyonu (MTF), Ayırma gücü

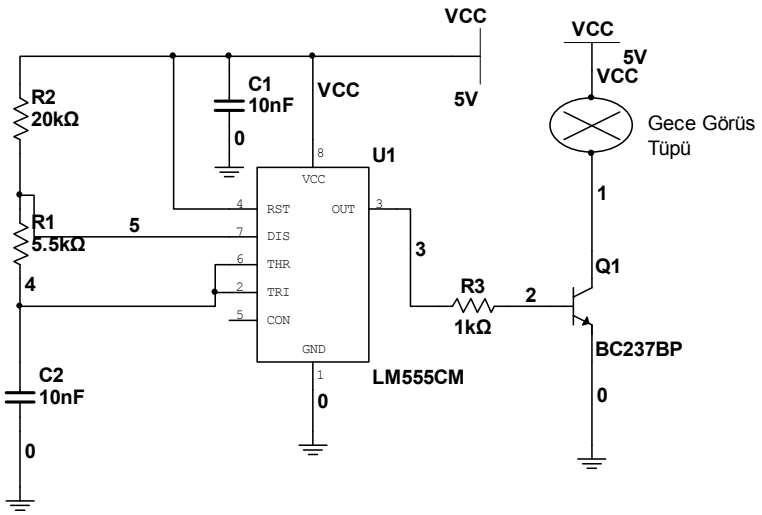
# 5. ULUSAL OPTİK, ELEKTRO-OPTÎK VE FOTONİK ÇALIŞMA TOPLANTISI PROGRAMI

ODTÜ KÜLTÜR VE KONGRE MERKEZİ 12 ARALIK 2003

| | | |
|---|---|---|
| 8:45-9:10 | KAYIT | |
| 9:10-9:20 | Açılış Konuşması | |
| OTURUM 1- Davetli Konuşmalar Oturum Başkanı: Atilla Aydınlı, Bilkent Üniversitesi | | |
| 9:20-9:50 | John P. R. David Sheffield | .Low Noİse Avalanche Photodiodes |
| 9:50-10:05 | Tank Reyhan Biikent | Türk Elektro-Optik Endüstrisi Üzerine Düşünceler |
| 10:05-10:20 | Biroî Erentürk ASELSAN A.Ş. | ASELSAN MGEO Grubu Elekîro-Optîk Tasarım Çalışmaları |
| 10:28-10:35 | Fatih Yaman K.K.K. Elekîro-optik Sist.Bkm. | Elektro-öptik Sistemler Bakım Merkezi Müdürlüğü Aktiviîelerİ |
| 10:35-10:50 | Ekme! Ozbay Bilkent | Ulusal Güvenlik Uygulamaları için Kızılötesi ve Morötesi Sensörler |
| 10:50-11:05 | Älphan Sennaroğlu Koç | Kızılaltı Katıhal Lazerleri |
| 11:05-11:30 | ARA | |
| OTURUM 2-Fotodedektörler ve Uygulamaları Oturum Başkanı: Yaşar Gürbüz, Sabancı Üniversitesi | | |
| 11:30-11:45 | Humbat Nasibov | InGaAs Detektör Temelli Işınım Termometresi |
| 11:45-12:00 | Bülent Aslan ODTÜ | InAs/GaAs Kuantum Nokta ve SiGe/Si Çoklu Eklem Kızılötesi Dedekîörler |
| 12:00-12:15 | Nebi Gül Ankara Üniversitesi | İnsan Gözü, İCCD, CCD Kamera ve Gece Görüş Cihazlarının Kıyaslanması ve MTF İyileştirilmesi |
| 12:15-12:30 | G. Başak Ballı ODTÜ | Mikro Uydu Kamera Tasarımı |
| 12:30-12:40 | Cengiz Beşikçi | Geniş Formatlı QWIP Termal Görüntüleyici |
| 12:40-12:50 | Tayfun Akın | Soğutmasız Kızılötesi Dedektör Teknolojileri |
| 12:50-14:00 | YEMEK ARASI | |
| | | |

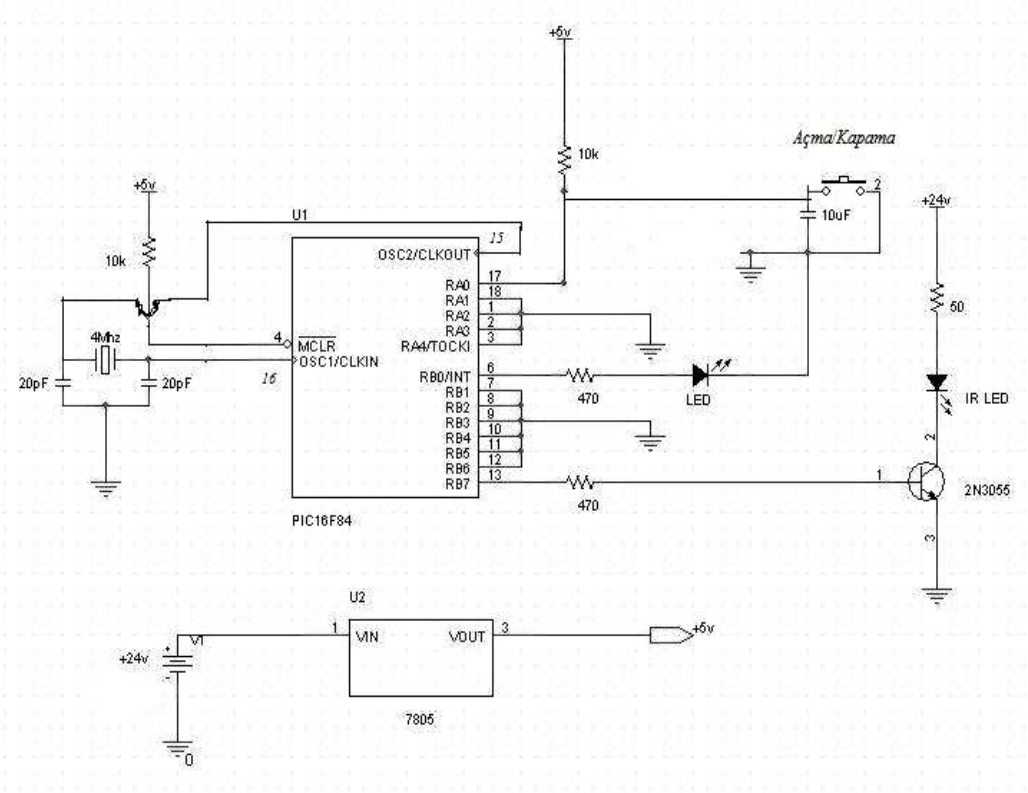
Ek-3 ICCD Görüntü Yoğunlaştırma Tüpü Güç Besleme Kontrol Devresi

## ICCD'nin GYT Güç Besleme Kontrol Devresi




Gece görüş tüpünü beslemek için gereken 5 kHz lik sinyal 555 entegresi kullanılarak üretilmiştir.

Ek-4 Kızılötesi (IR) Kaynak Devre Şeması




Kızılötesi (IR) kaynak için yukarıdaki devre kullanılmıştır. Burada PIC16F84A programlanabilir entegre kullanılarak yazılım kontrollu sinyal üreteci yapılmıştır.

## IR KAYNAĞI İÇİN PIC16F84A'YA YAZILAN KODLAR

```
LIST P=16F84
        INCLUDE "P16F84.INC"
        SAYAC1          EQU         H'20'
        SAYAC2          EQU         H'21'
        SAYAC3          EQU         H'22'
        SAYAC4          EQU         H'23'
        #DEFINE   LED       PORTB,1     ; PORT KONUMLARINI ADLANDIRMAK ICIN
        #DEFINE   BUTTON    PORTA,0     ; PORT KONUMLARINI ADLANDIRMAK ICIN
        #DEFINE   IR        PORTB,7     ; PORT KONUMLARINI ADLANDIRMAK ICIN
        ORG       H'0000'
        GOTO      START

GIRISLER
```

```
        BSF             STATUS,RP0
    MOVLW   B'00000000'         ; PORTB'NIN BUTUN UCLARINI CIKIS YAP
    MOVWF   TRISB
    MOVLW   B'00000001'         ; PORTA'NIN 0.BITINI GIRIS YAP
    MOVWF   TRISA
        BCF             STATUS,RP0
        BCF     LED
        BCF     IR
    RETLW   0
;150 MIKROSANIYE GECIKME

GECIK150
        MOVLW   .13
      MOVWF   SAYAC1
DONGU1
        MOVLW   .5
        MOVWF   SAYAC2
DONGU2
      DECFSZ  SAYAC2,1
      GOTO    DONGU2
      DECFSZ  SAYAC1,1
      GOTO    DONGU1

      RETLW   0

        ;50 MIKROSANIYE GECIKME

GECIK50
      MOVLW   .3
      MOVWF   SAYAC3
DONGU3
        MOVLW   .5
        MOVWF   SAYAC4
DONGU4
      DECFSZ  SAYAC4,1
      GOTO    DONGU4
      DECFSZ  SAYAC3,1
      GOTO    DONGU3
      RETLW   0
```

```
        ORG     30H
START                                   ; ANA PROGRAM BASLAR
          CALL      GIRISLER
      CLRF      SAYAC1
      CLRF      SAYAC2
      CLRF      SAYAC3
      CLRF      SAYAC4

BASLA
        BCF         LED
DONGU
        BTFSC       BUTTON
      GOTO      YAK
      GOTO      DONGU

YAK
      BSF       LED             ; LED'I YAKAR
      BSF       IR              ; IR LED'I YAKAR

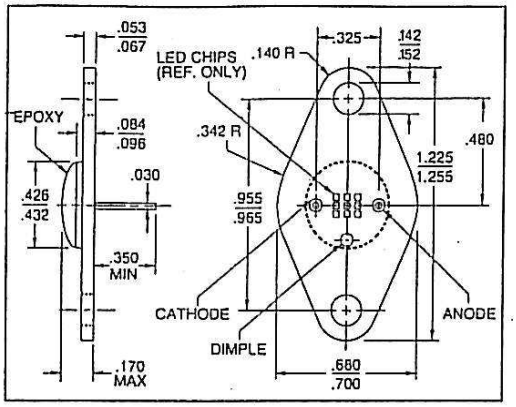
      CLRF      SAYAC1                  ; SAYACI SIFIRLAR
      CLRF      SAYAC2                  ; SAYACI SIFIRLAR
      CLRF      SAYAC3                  ; SAYACI SIFIRLAR
      CLRF      SAYAC4                  ; SAYACI SIFIRLAR
        BSF     IR
      CALL      GECIK150        ; 150Us LIK GECIKME ALTPROGRAMINI CAGIRIR

      BCF       IR              ; IR LEDI SONDUR
      CALL      GECIK50         ; 50Us LIK GECIKME ALTPROGRAMINI CAGIRIR

      BTFSS     BUTTON
      GOTO      BASLA
     GOTO       YAK
      END
```

Ek 5 OD-669 Kızılötesi (IR) Diyot Özellikleri

# HIGH-POWER GaAlAs IRLED ILLUMINATOR — OD-669




## FEATURES

- Highest power output available
- 880nm peak emission
- Nine chips connected in series
- Very wide angle of emission
- Electrically isolated case

All surfaces are gold plated. Dimensions are nominal values in inches unless otherwise specified.

## ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS AT 25°C

| PARAMETERS | TEST CONDITIONS | MIN | TYP | MAX | UNITS |
|---|---|---|---|---|---|
| Total Power Output, $P_o$ | $I_F$ = 300mA<br>$I_F$ = 5A | 390 | 500<br>6500 | | mW |
| Peak Emission Wavelength, $\lambda_P$ | $I_F$ = 50mA | | 880 | | nm |
| Spectral Bandwidth at 50%, $\Delta\lambda$ | | | 80 | | nm |
| Half Intensity Beam Angle, $\theta$ | | | 120 | | Deg |
| Forward Voltage, $V_F$ | $I_F$ = 300mA | | 13.5 | 15 | Volts |
| Reverse Breakdown Voltage, $V_R$ | $I_R$ = 10µA | 5 | 30 | | Volts |
| Capacitance, C | $V_R$ = 0V | | 11 | | pF |
| Rise Time | | | 3 | | µsec |
| Fall Time | | | 3 | | µsec |

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS AT 25°C CASE

| | |
|---|---|
| Power Dissipation[1] | 6W |
| Continuous Forward Current | 400mA |
| Peak Forward Current (10µs, 400Hz)[2] | 5A |
| Reverse Voltage | 5V |
| Lead Soldering Temperature (1/16" from case for 10sec) | 240°C |

[1]Derate per Thermal Derating Curve above 25°C
[2]Derate linearly above 25°C

## THERMAL PARAMETERS

| | |
|---|---|
| Storage and Operating Temperature Range | -55°C to 100°C |
| Maximum Junction Temperature | 100°C |
| Thermal Resistance, $R_{THJA}$[1] | 60°C/W Typical |
| Thermal Resistance, $R_{THJA}$[2] | 16°C/W Typical |

[1]Heat transfer minimized by measuring in still air with minimum heat conducting through leads
[2]Air circulating at a rapid rate to keep case temperature at 25°C

OPTO DIODE CORP.
750 Mitchell Road, Newbury Park, California 91320
Phone (805) 499-0335 FAX (805) 499-8108

Ek 6 TJEECS'de Yayımlanan Makale

TÜBİTAK

Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.18, No.1, 2010, © TÜBİTAK
doi:10.3906/elk-0811-9

# Improved analytical modulation transfer function for image intensified charge coupled devices

**Nebi GÜL*, Murat EFE**
*Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering*
*Ankara University, 06100 Tandogan, Ankara-TURKEY*
*e-mail: nebigul@yahoo.com, efe@eng.ankara.edu.tr*

**Abstract**

*The basic problem of simulation and modeling of Image Intensified Charge Coupled Device (ICCD) is the difference between the analytical Modulation Transfer Function (MTF) formulation used in the model and the experimentally obtained MTF. An investigation into the MTF of ICCD sub-components reveal that the MTF of the Image Intensifier Tube (IIT) is the main factor in this deviation.*

*In this study, a regulation factor for the MTF of $3^{rd}$ generation IITs has been developed. A commonly used MTF formulation for IITs has been modified to include a regulation factor which has helped produce more precise MTF values for the Night Vision Sight (NVS) device. The results obtained through the new formulation have been compared with the experimental results and it is revealed that the proposed formulation yields MTF values within 3% of the experimental results, on average, while the most commonly used formulation produces approximately 29.5% difference, which amounts to almost 10% improvement in analytical analysis. The analysis is then extended to other generations of IITs where similar improvements have been achieved.*

**Key Words:** *Image intensified charge coupled device (ICCD), image intensified tube, modulation transfer function, simulation.*

## 1. Introduction

How well an optical system performs is usually considered a function of their ability to discern the smallest object from the farthest distance. Military specifications specify the Minimum Resolvable Contrast (MRC) and/or Minimum Resolvable Temperature Difference (MRTD) as the most important criteria for optical systems and environmental conditions (night, etc.), and thus determines the lower limits for the user to measure the aforementioned system parameters. On the other hand, the Modulation Transfer Function (MTF), expressed

*Nebi Gul is a Colonel with the Turkish Armed Forces and the content of this work does not reflect the position or policy of the Turkish Army and no official endorsement should be inferred.

90

as line pairs/mm (lp/mm) or cycles/mrad, is a measure of system response in terms of spatial frequency and is probably the best measure of performance (MoP) for such systems. MTF of an optical system is a measure of its ability to transfer contrast at a particular resolution level from the object to the image. In other words, MTF is a way to incorporate resolution and contrast into a single specification. From a visual standpoint, high values of MTF correspond to good visibility, and low values to poor visibility. But this quality of visibility depends on frequency. Perhaps an easy way to interpret MTF is by thinking of imaging a target with black and white lines, i.e. a target with 100% contrast. It is a known fact that no optical system at any resolution can fully transfer this contrast to the image due to the diffraction limit [1]. In fact, as the line spacing on the target is decreased, i.e., the frequency increases, it becomes increasingly difficult for the optical system to efficiently transfer this contrast. Therefore, as the frequency increases, contrast of the image decreases and an MTF graph, which relates the fraction of transferred contrast as a function of the line frequency, is the best way to observe such performance degradation.

However, while the MTF is such an important aid to objective evaluation of the image-forming capability of optical systems, it is usually obtained experimentally, thus, leaving researchers without an analytical solution in terms of measuring the performance [2, 3]. Although there are many analytical MTF expressions proposed for optical systems, they usually do not completely fit experimentally obtained data. Accuracy of commercial MTF measurement systems ranges from 5% to 10% in absolute MTF, however obtaining accuracy to within 1% is also possible [4]. Thus, existence of an analytical expression that better fits the experimentally obtained MTF, would help researcher/manufacturers better determine the image quality of the optical system at the design phase. This is rather important as analytical expressions are employed at the modeling stage of systems and modeling is a powerful tool to gain insight into the expected performance of systems at the beginning without having to build the whole system. Hence, a less accurate mathematical model will produce reduced expectations in terms of system performance. Moreover, there are systems for training purposes that simulate the actual system functionality without having the system itself. Such systems rely on accurate mathematical models of the system and analytical expressions that result in less accurate mathematical model will lead to a training system with degraded performance.

In this study the analytical MTF formulation presented in [5] for an OMNI series $3^{rd}$ generation IIT has been modified to better fit the experimental results given in Military standards [6]. The resulting analytical expression has been utilized to come up with an analytical MTF formulation for an ICCD for comparison purposes as the MTF data for an ICCD employing a $3^{rd}$ generation night vision sight device was available. This study has also extended the analysis (see Appendix) to other generations of IIT in terms of analytical MTF formulation in order to demonstrate that similar approach could be adopted for all generations of IIT [7, 8].

## 2. Modulation transfer function analysis

The Modulation Transfer Function (MTF), describing the resolution and performance of an optical system is the ratio of relative image contrast divided by relative object contrast. When an object is observed through an optical system, the resulting image will be somewhat degraded due to inevitable aberrations and diffraction phenomena. Aberration is the loss of image in an optical system when the system fails to focus the incoming beams properly. Diffraction is another type of image loss caused by reflections and deviations of the light beams

at transition points. While it is possible to prevent aberration by means of using appropriate optical techniques, due to the natural structure of light, even with the optical systems designed in the best way possible, it is not possible to totally eliminate the effect of diffraction. Hence, it is said that all optical systems are diffraction-limited [3]. Moreover, real optical systems will not fully conform to the design data. Manufacturing errors, assembly and alignment errors in the optics will deteriorate the overall imaging performance of the system [3]. As a result, in the image, bright highlights will not appear as bright as they do in the object, and dark or shadowed areas will not be as black as those observed in the original patterns. In general a target can be defined by its spatial frequency (number of bright and dark areas per millimeter) and the contrast (the apparent difference in brightness between bright and dark areas of the image). Performance measurement of any diffraction-limited system is carried out by sensing a test object (usually a square, triple bar pattern) through the optical/electro-optical system. Effects of diffraction on contrast with respect to the increasing frequency is given in Figure 1.

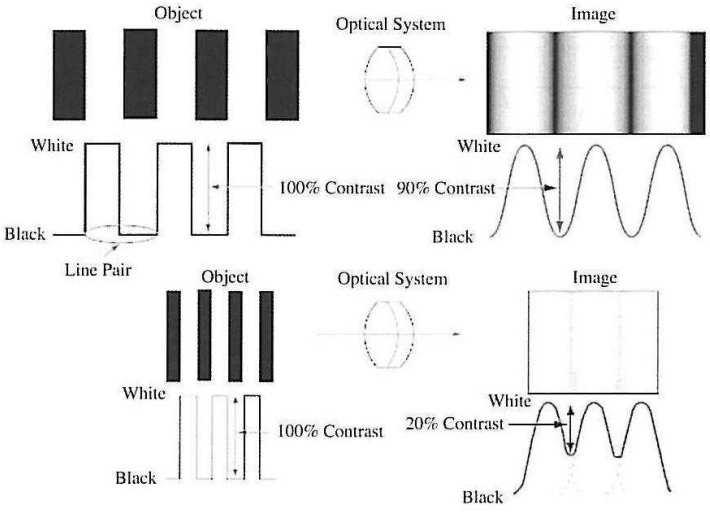



**Figure 1.** Effects of diffraction on the amount of contrast as the frequency is increased.

In an electrical system, general information about a circuit can be obtained from its frequency response (i.e., transfer function). Similarly, in an electro-optical system, general information about the system could also be extracted from its spatial frequency response. If the distance between consecutive target peak values is $N$ (in millimeters), then the spatial frequency of the target is given by

$$R = 1/N \tag{1}$$

This term has units of line pairs per millimeter (lp/mm) in resolving cards. In afocal systems, generally, it is more common to use units of cycles/mrad. An afocal system is one in which the object or image is at infinity. Definition of the modulation in optical systems is as follows [4].

$$\text{Modulation} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} \tag{2}$$

where, $B_{\min}$ and $B_{\max}$ denote values of minimum and maximum amplitude, respectively, as illustrated in Figure 2.

By convention, the modulation transfer function is normalized to unity at zero spatial frequency. For low spatial frequencies, the modulation transfer function is close to 1 (i.e. 100%) and generally falls as the spatial frequency increases until it reaches zero. The contrast values are lower for higher spatial frequencies as shown in Figure 1. When the contrast value reaches zero, the image becomes a uniform shade of grey.

The intersection of the modulation function and the minimum acceptable modulation gives the "resolution power limit" as shown in Figure 3. The minimum acceptable modulation level is also known as detection threshold or noise equivalent modulation level. In some cases resolution limit, on its own, is not adequate to determine the performance of a system. In Figure 3, systems A and B have the same resolution power, but system A will produce a better image because the contrast of A at the lower frequencies is better.

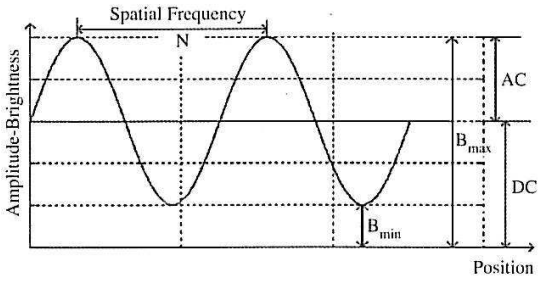



**Figure 2.** Concept of modulation.

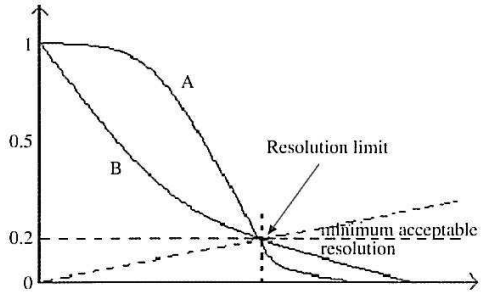



**Figure 3.** Two different MTFs with the same resolution limit.

## 3. Regulating the IIT's MTF

Image intensifier devices are electronic devices that sense low-intensity optical light, and convert it to a visible image. As shown in Figure 4, the IIT consists of a photocathode, an ion barrier film, a micro-channel plate and a phosphor screen. Low intensity photons originating from the object of interest, on passing through on objective lens, reach the photocathode. The photocathode converts the photons into electrons. The photocathode is wavelength sensitive, depending on the selected material; in this work, it operates at around 600–900 nm in $3^{rd}$ generation devices. The photocathode is followed by a micro-channel plate where the photoelectrons are amplified. The plate resembles a very thin glass plate and consists of millions of glass capillaries ($\sim$2 million channels). Passing through the micro-channel plate with increased gain, electrons subsequently land on the phosphor screen. The screen is phosphor-coated, which radiates under the high-energy electron irradiation and, in turn, produces a visible image of the interested object.

A generally accepted MTF formulation for an IIT is given by [5]

$$MTF_{\mathrm{IIT}}(f_x) = e^{-2\pi^2\sigma_{\mathrm{IIT}}^2 f_x^2}, \tag{3}$$

where $\sigma_{IIT}$ is the 1/e spot size of the IIT and $f_x$ is the spatial frequency in lp/mm. Spot size is related to the sensitivity of the tube and components of the system (microchannel width, phosphor screen material and

voltage gain). In general, the spot size is not given and has to be calculated. The spot size of the IIT utilized in this study (OMNI-III, 18 mm, GEN III) has been calculated as approximately 15 $\mu$m.

Table 1 displays the calculated MTF values of the $3^{rd}$ generation IIT employed in this study for varying spot sizes ($\sigma_{IIT}$) and spatial frequencies whereas Table 2 presents the measured[1] and calculated MTF values at the reference spot size of $\sigma = 15$ $\mu$m for OMNI-III IIT in order to highlight the difference between the calculated MTF through the common analytical expression i.e., equation (3) and the measured MTF.

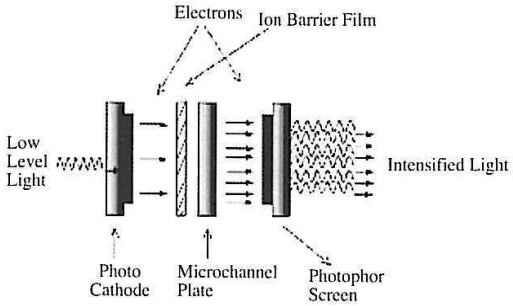



**Figure 4.** Intensifying light in an image intensifier tube.

**Table 1.** Calculated MTF value of an OMNI-III series IIT using equation (3).

| | MTF Values | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_{IIT}$ ($\mu$m) | 10 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 25 |
| $f_x = 0$ | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| $f_x = 2.5$ | 0.9877 | 0.9726 | 0.9689 | 0.9650 | 0.9608 | 0.9564 | 0.9518 | 0.9258 |
| $f_x = 7.5$ | 0.8949 | 0.7789 | 0.7526 | 0.7255 | 0.6979 | 0.6698 | 0.6414 | 0.4996 |
| $f_x = 15$ | 0.6414 | 0.3681 | 0.3208 | 0.2771 | 0.2372 | 0.2012 | 0.1692 | 0.0623 |
| $f_x = 25$ | 0.2912 | 0.0623 | 0.0425 | 0.0283 | 0.0184 | 0.0116 | 0.0072 | 0.0004 |

**Table 2.** Measured MTF values for OMNI-III IIT and calculated data through equation (3).

| Spatial Freq. (lp/mm) | Measured MTF | Calculated MTF | Difference |
|---|---|---|---|
| $f_x = 0$ | 1.00 | 1.00 | 0 |
| $f_x = 2.5$ | 0.83 | 0.9726 | −0.1426 |
| $f_x = 7.5$ | 0.60 | 0.7789 | −0.1789 |
| $f_x = 15$ | 0.380 | 0.3681 | + 0.0119 |
| $f_x = 25$ | 0.20 | 0.0623 | + 0.1377 |

Figure 5 displays the MTF plots of an IIT for varying spot size, values ranging from 10 $\mu$m to 25 $\mu$m, along with the measured MTF at the spot size value of 15 $\mu$m.

[1]Measured MTF values are taken from MIL-I-49453 06 November 1989 as well as from manufacturer performance data sheet for OMNI-III series IIT.

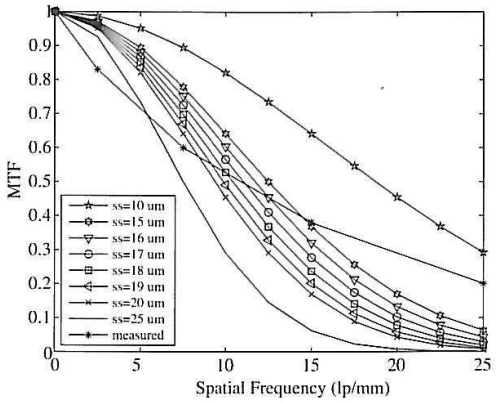



**Figure 5.** MTF (without regulation) of OMNI-III, 18 mm, GEN III IIT for varying spot sizes (ss) and measured MTF.

Figure 5 reveals that the original IIT MTF formulation given by equation (3) produces higher MTF for low frequencies and lower MTF for high frequencies in comparison to the measured MTF. Intuitively, such an outcome calls for a logarithmic two-piece regulation around a crossover frequency. Moreover, it is clear from Figure 5 that the measured MTF value for the spot size value of 15 $\mu$m intersects the calculated MTF for the same spot size at the spatial frequency value of 14.5 lp/mm. Since spatial frequency is given as integer numbers, 15 lp/mm could be chosen as the crossover frequency ($f_{co}$). Please note that since MTF is monotonic, a single term regulation factor would yield a good fit to the measured data before/after the crossover frequency while worsening the fit after/before it.

Considering the fact that the outcome of the analytical MTF formulation needs to produce decreased (increased) MTF values at lower (higher) frequencies, a regulation factor given by equation (4) has been proposed for a better fit.

$$K(f_x) = \begin{cases} 0.01\pi f_x \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right), & f_x < f_{co} \\ 0.01 f_x \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right), & f_{co} \le f_x \le f_{\text{cutoff}} \end{cases} \tag{4}$$

where $f_{\text{cutoff}}$ is 25 lp/mm[2].

Then the regulated analytical MTF for OMNI-III IITs is obtained by adding the regulation factor given by equation (4) to equation (3). The resulting MTF is then given by the following equation:

$$MTF_{\text{IIT}_{\text{reg}}}(f_x) = \begin{cases} e^{-2\pi^2\sigma_{\text{IIT}}^2 f_x^2} + 0.01\pi f_x \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right), & f_x < f_{co} \\ e^{-2\pi^2\sigma_{\text{IIT}}^2 f_x^2} + 0.01 f_x \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right), & f_{co} \le f_x \le f_{\text{cutoff}} \end{cases} \tag{5}$$

The MTF values calculated through equation (5) at varying spatial frequencies for the reference spot size of $\sigma = 15\mu$m, are checked against the experimental data. The results are shown in Table (3).

[2]In Military Specifications MIL-I-49453 06 November 1989 and MIL-PRF-49040F 04 March 1999, etc. MTF's spatial frequencies usually are 2.5, 7.5, 15 lp/mm, the upper limit frequency 25 lp/mm is showed the Group 4 in the USAF 1951 Bar Target Chart and it's enough for implementation of the sensor model as seen in [9].

**Table 3.** Measured $MTF_{15}$ values for OMNI-III IIT and calculated data by equation (3).

| Spatial Freq. (lp/mm) | Given MTF (Measured) | Calculated MTF (with regulation) ($\sigma_{IIT} = 15$ $\mu$m) | Difference |
|---|---|---|---|
| $f_x = 0$ | 1.00 | 1.00 | 0 |
| $f_x = 2.5$ | 0.83 | 0.8319 | −0.0019 |
| $f_x = 7.5$ | 0.60 | 0.6156 | −0.0156 |
| $f_x = 15$ | 0.380 | 0.3681 | +0.0119 |
| $f_x = 25$ | 0.20 | 0.1900 | +0.0100 |

As it can be seen in Table (3), the measured MTF formulation improves the accuracy of the analytical formulation by producing results closer to the experimental data.

Figure 6 displays the MTF plots obtained utilizing equation (5), and it is clearly seen that unlike the plots shown in Figure 5, the plot given in Figure 6 is very close to the measured MTF plot both in shape and value for the system spot size of 15 $\mu$m. This increase in accuracy that is obtained by the proposed modification to the most common analytical expression will help manufacturers observe image quality closer to the design expectations.

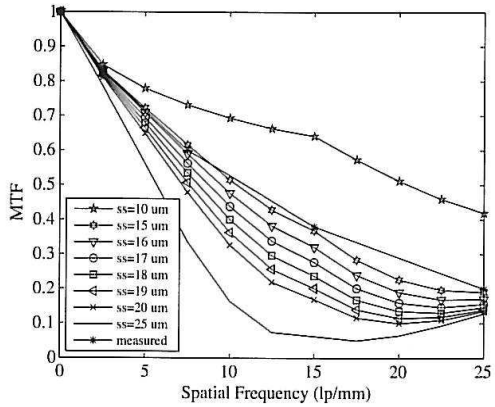



**Figure 6.** MTF (with regulation) of OMNI-III, 18 mm, GEN III IIT for varying spot sizes (ss) and the measured MTF.

## 4. Regulated MTF Applied to ICCD

An IIT is a device that amplifies the light at its entrance and in turn produces output light of sufficient intensity to make it visible. One such system that produces images at low light levels is called the Image Intensified Charged Coupled Device (ICCD) and is composed of suitable optics, the IIT, CCD and a screen. Resolution characterization defined by MTF is in terms of one-dimensional spatial frequency response, while in reality images are two-dimensional, and the use of one-dimensional frequency responses implies that spatial responses are independent functions of $x$and $y$. Moreover, the assumption of linearity implies that MTF of an optical system could be obtained by multiplying the MTFs of individual subsystems that form the whole system [5]. Thus, the analytical expression for the MTF of ICCD is

$$MTF_{ICCD} = MTF_{\text{optics}} \cdot MTF_{\text{IIT}} \cdot MTF_{CCD} \cdot MTF_{\text{screen}} \quad (6)$$

$$MTF_{\text{ICCD}} = \left[1 - \frac{4}{\pi}\left(\frac{f_x \lambda}{D_0}\right)\right] \cdot \left[e^{-2\pi^2\sigma^2 f_x^2} + K(f_x)\right] \cdot \left[\frac{\sin(\pi \cdot d_H \cdot f_x)}{\pi \cdot d_H \cdot f_x}\right] \cdot \left[e^{-2\pi^2\left(\frac{N \cdot d \cdot f_x}{2.35NTV}\right)^2}\right] \quad (7)$$

where $D_0$ is the aperture diameter (mm), $\lambda$ is the radiation wavelength (mm), $d_H$ is the detector size in the horizontal direction (mm), $N$is the number of detectors, $d$ is the detector size (mm) and $NTV$ is the display resolution (expressed as Television Lines per Picture Height, or TVL/Ph) [5].

As pointed out earlier, some approximate analytical expressions for optical systems are readily available. However, these expressions provide only a rough estimate of the actual, i.e., experimentally obtained MTF. ICCD, being a modern electro-optical system, is unfortunately no exception and the proposed analytical formulation for ICCD devices could only be confirmed through comparison with measured values. Thus, MTF of an ICCD is analyzed in order to demonstrate that the proposed regulation to the IIT's analytical MTF expression also improves the MTF of an optical system which comprises the IIT as a subcomponent. It is shown that, when the proposed MTF formulation for IITs is utilized, the resulting analytical MTF expression for the ICCD produces closer MTF values to the experimentally obtained MTF. Although actual MTFs or related data from hi-tech optical systems is not commonly revealed, one experimentally obtained MTF of an ICCD was published in the September 1995 issue of Laser Focus World magazine [10]. This MTF has provided the means for comparing experimental and the newly produced analytical MTFs for an ICCD. Figure 7 depicts both the experimental MTF and the analytical solution given by equation (7).

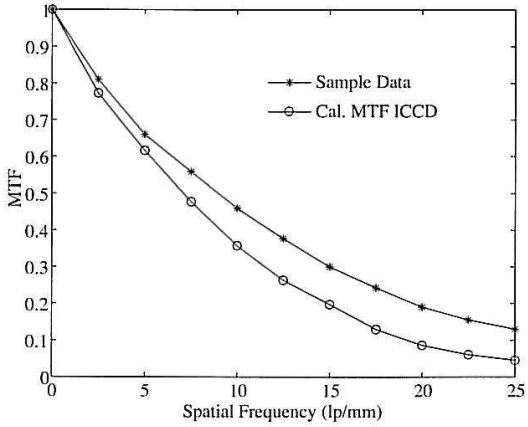



**Figure 7.** Analytically calculated ICCD MTF values with regulation versus the sample ICCD MTF.

As it can be clearly seen in Figure 7, the MTF obtained using (5) the analytical solution is very close to the measured MTF, up to 25 lp/mm. The proposed modification produces better results for lower frequencies as the fit worsens with the increasing spatial frequency. Nevertheless, when analyzed for the whole frequency spectrum up to the cut-off frequency, the proposed analytical expression yields MTF values within 3% of the experimental results on average.

## 5. Conclusions

In this study, a regulation factor to model the analytical MTF of $3^{rd}$ generation image intensifier tubes has been proposed. The most commonly used MTF formulation of IIT devices has been modified by employing a regulation factor which has helped MTF formulation of the NVS device and produce much more precise results, i.e., approaching those obtained experimentally. The results obtained through the formulation are compared with the experimental results and it has been observed that the proposed formulation yields MTF values within 3% of the experimental results on average in comparison to the 29.5% difference obtained with the expression without regulation.

Also, the addition of the regulation factor to the IIT's MTF has also been tested when it is used as a part of an optical system, namely, an ICCD. With the proposed analytical formulation MTF ICCD cameras could be analytically determined with more accuracy without resorting to experimental means for spatial frequencies up to 25 lp/mm. The analysis is extended to other generations of IITs, results of which are given in the appendix.

## References

[1] Shannon R.R. (Editor), Wyant C.J. "Applied Optics *and Optical Engineering*" Academic Press, Chapter 6, 1980.

[2] Biberman L.M. (Editor), "*Electro-Optical Imaging: Systems Performance and Modeling*", SPIE Press, Chapters 4 and 5, 2000 .

[3] Abbott F. "*The Theory of MTF*", MTF Measurement Equipment The Optical Industry and Systems Purchasing Directory, pp 639-651, 1980.

[4] Boreman G.D. "*Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*" Tutorial Texts in Optical Engineer Volume TT52, SPIE Press, pp 85-101, 2001.

[5] Holst G.C., "*System MTF, CCD Array, Cameras and Display*" ICO Publishing, pp 269, 1996.

[6] Anonymous, "MIL-I-49453(CR) *Image Intensifier Assembly 18 mm Microchannel Wafer MX-10130*" USA Military Specification, 1989.

[7] Gul, N. and Efe, M., "*Comparison of Human Eye, ICCD, CCD and Night Vision Devices and MTF Improvement*" $5^{th}$ National, Electro-Optical and Photonics Working Meeting (Unpublished), METU- Ankara-Turkey, December 2003 (in Turkish).

[8] Gul, N., Efe, M. and Larochelle, V., "*Development of the Optical Transfer Function (OTF) For Image Intensified CCD, Particularly With OTF Of Image Intensifier Tubes (IIT)*" IEEE 25th Convention of Electrical & Electronics Engineers in Israel, pp. 36-40, December 2008.

[9] Ientilucci E. J., "*Synthetic Simulation and Modeling of Image Intensified CCDs (IICCD)*" M.Sc. Thesis, Center for Imaging Science in the College of Science Rochester Institute of Technology, 2000.

[10] Williams George M., Morley M. Blouke, "*Laser Focus World Magazine*", pp. 129- 136, September 1995.

# Appendix

In this appendix the analysis given for the $3^{rd}$ generation IITs has been extended to other generations of IIT in order to demonstrate that similar performance achievement is possible by regulating the most commonly used analytical MTF expressions defined for IITs

We begin with the $1^{st}$ generation IITs. The regulated MTF expression for a $1^{st}$ generation IIT, given below by equation (A1) is obtained after a similar analysis described for the $3^{rd}$ generation IIT. The regulation factor is added to the commonly used MTF expression for IITs:

$$MTF_{\mathrm{IIT}_{reg}}(f_x) = \begin{cases} e^{-2\pi^2\sigma_{\mathrm{IIT}}^2 f_x^2} + 0.0065\pi f_x \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right), & f_x < f_{co} \\ e^{-2\pi^2\sigma_{\mathrm{IIT}}^2 f_x^2} + 0.0035 f_x \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right), & f_{co} \le f_x \le f_{\mathrm{cutoff}} \end{cases} \quad (A1)$$

Here, the crossover ($f_{co}$) and cut-off ($f_{\mathrm{cutoff}}$) frequencies are the same as the $3^{rd}$ generation IIT and the spot size has been calculated as 18 $\mu$m. Figure A1 displays the experimental (measured) and calculated MTF values with regulation for a $1^{st}$ generation IIT.

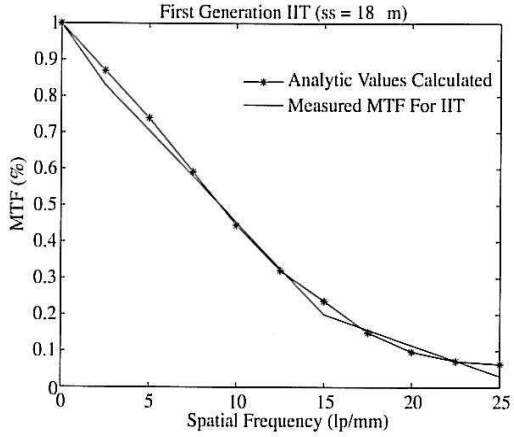



**Figure A1.** Comparison of calculated 'MTF with regulation' to the measured MTF for OMNI-I IIT.

When a similar analysis is carried out for the $2^{nd}$ generation IIT the following modified MTF expression with regulation is obtained:

$$MTF_{\mathrm{IIT}_{reg}}(f_x) = \begin{cases} e^{-2\pi^2\sigma_{\mathrm{IIT}}^2 f_x^2} + 0.006\pi f_x \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right), & f_x < f_{co} \\ e^{-2\pi^2\sigma_{\mathrm{IIT}}^2 f_x^2} + 0.01 f_x \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right), & f_{co} \le f_x \le f_{\mathrm{cutoff}}. \end{cases} \quad (A2)$$

The system spot size for this analysis has been calculated as 18 $\mu$m and the crossover ($f_{co}$) and cut-off ($f_{\mathrm{cutoff}}$) frequencies are the same as the $3^{rd}$ generation IIT. Figure A2 displays the experimental[3] and calculated MTF values with regulation for a $2^{nd}$ generation IIT.

[3]MIL-PRF-49428 (CR) Aviator's Night Vision Imaging System AN/AVS-6(V) 25 September 1995

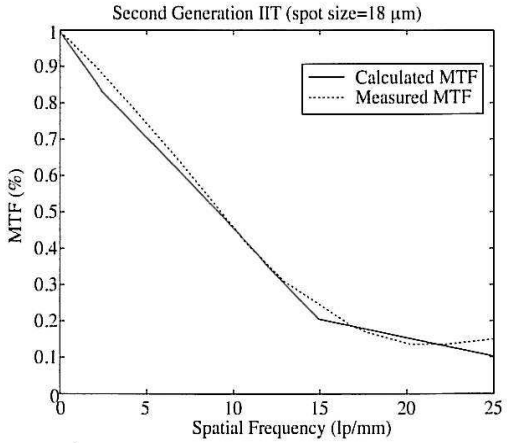



**Figure A2.** Comparison of calculated MTF with regulation to the measured MTF for OMNI-II IIT.

The proposed analytical MTF expression for the $4^{th}$ generation IITs is given by following equation where the regulation factor is added to the IITs MTF expression:

$$MTF_{\mathrm{IIT}_{reg}}(f_x) = \begin{cases} e^{-2\pi^2\sigma_{\mathrm{IIT}}^2 f_x^2} + 0.0055\pi f_x \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right), & f_x < f_{co} \\ e^{-2\pi^2\sigma_{\mathrm{IIT}}^2 f_x^2} + 0.01 f_x \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right), & f_{co} \leq f_x \leq f_{\mathrm{cutoff}}, \end{cases} \tag{A3}$$

where, the crossover ($f_{co}$) and cut-off ($f_{\mathrm{cutoff}}$) frequencies are the same as the $1^{st}$, $2^{nd}$ and $3^{rd}$ generation IITs, namely, 15 lp/mm and 25 lp/mm, respectively. The calculated spot size for the $4^{th}$ generation IIT is 10 $\mu$m. Both the regulated MTF and measured MTF values[3] for OMNI-IV IIT is displayed in Figure A3.

The proposed analytical expressions for the $1^{st}$, $2^{nd}$ and $4^{th}$ generation IITs produce even better accuracies than we achieved for the $3^{rd}$ generation IIT. The proposed modification to the $1^{st}$, $2^{nd}$ and $4^{th}$ generation IIT analytical MTF expressions yields MTF values within 1% of the experimental results on average.

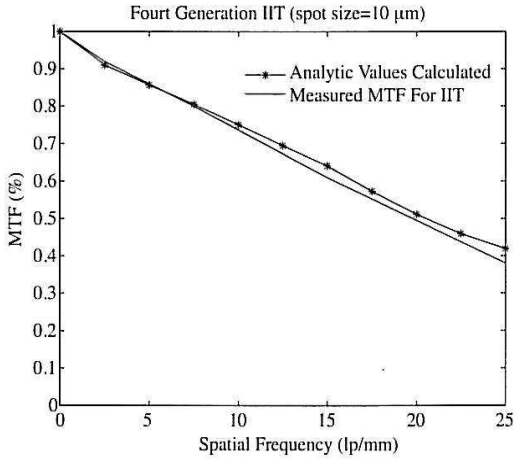



**Figure A3.** Comparison of calculated MTF with regulation to the measured MTF for OMNI-IV IIT.

Ek 7 Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar ve Özellikleri

ÇALIŞMALARDA KULLANILAN CİHAZ LİSTESİ

1. AKİTA Model CCD

- ✓ 1/3.2 " CCD sensor (2.1 Megapixel)
- ✓ 1600 x 1200, 1280x960, 640x480 pixel pic.size video clips: 320x240 pixel
- ✓ zoom optical 3X, digital 2X

2. TM-6 model Panasonic CCD ;

- ✓ Piksel **:** 752 (H)*x* 582 (V)
- ✓ Hücre alanı: 8,6µm*x*8,3 µm
- ✓ Tarama: 625 çizgi CCIR
- ✓ TV Çözünürlüğü: 560 (H)*x* 420 (V) özelliklere sahiptir.
- ✓ ½" interline transfer
- ✓ Yüksek çözünürlükte tarama

3. Gece Görüş

Büyütme **:** X1

Görüş Alanı : 40 º

Görüntü Kazancı (Min) : 2500

Görüntü Yoğunlaştırıcı Tüp : Gen III

Objektif Grubu

Etkili Odak Mesafesi ($f_l$) : 27 mm

Odak Mesafesi : 25 cm – Sonsuz

F-sayısı, max : F/1.2

Oküler Grubu

Odak Uzunluğu : 27 mm

Göz Mesafesi : 15 mm

4. SONY video kayıt cihazı.

5. IR Kaynağı

6. IR ledli CCD kamera

EK 8 Aktif Görüntü Algılama ve Uygulama Örneği

Açık Denizden Görüntü Algılamaya İlişkin Uygulama, Burst Illumination Laser (BIL-Qinetic UK)

Burst Illumination Laser combines active laser illumination with range gating to pruduce high definition images.

Although passive infrared devices are useful in detecting objects at long range, they are so good at identifying the target object or distibguishing vehicle types and reading ship's names. Burst Illumination Laser, utilises an eyesafe 1.4 micro m laser to illuminate the target and a shortwave infrared camera to interpret the return.

The advantages of the system are:
Short Wave Infared(SWIR) band gives up to 5X better resolution then long wave IR
Longer range or better identification probability,
Choise of waveband enables eye safety to be designed in,
Needs no background light, starlight or temperature difference between target and background,
Can read ships names at long range,
Range gating system design gives some penetration throught mist and spray relatively covert
BIL can identify and provide covert surveillance of targets up to 20 km away, it performs better than passive infrared systems and can penetrate some smoke or mist.



Ship viewed by burst illumination laser at 9 km

EK 8 Aktif Görüntü Algılama ve Uygulama Örneği

**(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)**

EK 8 Aktif Görüntü Algılama ve Uygulama Örneği

**(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)**

**(19) VVbria Intellectual Property Organizatiou**
International Bureau

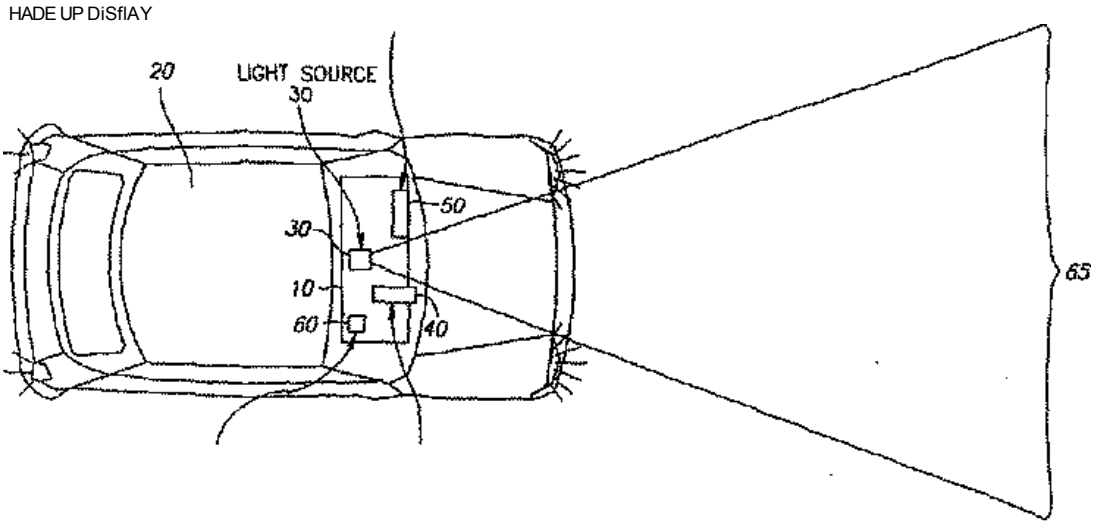
IIİİİIIIIIIİİİM IIIIIn III

**(43) Internatioaal Publication Date 12 February 2004 (12.02.2004)**

**PCT**

**(10) International Pubîication Number**

(54) TttİE: VEHICLE MOUNTED NIGITT VISION tMAGING SYSTEM AND METHOO




57) Abstract: A vehicîe nıounted imaging system and rnethod, enabling seîective imaging of objects m a low-visibility environ-menî. The system incIudes a îighî sonrce (30) providing non-visible îight pulses and a camera (40) having an iraage intensîfîer enabîed to gate seîected received iroages. The îight source may be a laser generator, which may be enabled to generale a puîse width related to the depîh of a fieîd to be imaged. The gated image intensifier may determine gating time spans according to the depth of a fieîd to be imaged

# ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nebi GÜL

Doğum Yeri : Kars-Selim

Doğum Tarihi : 01 Kasım 1964

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce-Fransızca

Eğitim Durumu (Kurumu ve Yıl)

Lise : Işıklar As. Lisesi Bursa (1982)

Lisans : H. Ü. Müh. Fak. Elk.-Elektr. Müh. (1987)

Lisans : G.Ü. İ.İ.B.F. İşletme Bölümü (1999)

Yüksek Lisans : A. Ü. Fen Bil.Enst. Elektr. Müh. Anabilim Dalı (2003)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

K.K.K.lığı 23 Yıl.

Yayınları (SCI ve Diğer)

**Gül N.,** Efe M. and Larochelle V. 2008 "Development Of The Optical Transfer Function (OTF) For Image Intensified CCD, Particularly With OTF Of Image Intensifier Tubes (IIT)" IEEE 25th Convention of Electrical & Electronics Engineers in Israel (IEEEI 2008), Processing Letters,1-4244-2482-5, pp. 036-040

**Gül N.** ve Efe M., 2010 "Development of a Better Analytical Modulation Transfer Function (MTF) for Image Intensified CCDs Through Modifying MTF of the Image Intensifier Tube" Turk J. Elec.& Comp. Sci, Vol.18, No.1,2010 pp.71-81