



TERMAL OBJEKTİFLERDE GÖRÜNTÜ KESKİNLİĞİNİN ÖLÇÜLMESİ

Zehra DERTLİ EMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Zehra DERTLİ EMİR

27/07/2021

TERMAL OBJEKTİFLERDE GÖRÜNTÜ KESKİNLİĞİNİN ÖLÇÜLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Zehra DERTLİ EMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

ÖZET

Termal görüntüleme sistemlerinin üretimi sırasında, görüntü kalitesini etkileyen parametrelerin ölçülmesi, test edilmesi gerekmektedir. “Modülasyon Transfer Fonksiyonu” yani MTF hesabı, görüntü sistemlerinde keskinlik parametresinin ölçülmesi için kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu ölçümlerin, görüntüleme sisteminin alt bileşenleri olan dedektör ve objektif seviyesinde de yapılması gerekmektedir. Bu çalışma, termal görüntüleme sisteminin alt bileşeni olan termal objektiflerin seri üretimi sırasında, ISO 12233 standardını temel alan “Eğik Kenar Yöntemi” ile MTF hesabının yapılması üzerine temellenmiştir. İlk adım olarak, doğrulanmış ve kullanımda olan bir kullanıcı ara yüzü ve test alt yapısı ile karşılaştırma yapılarak, MTF hesabı için tasarlanan algoritmanın matematiksel doğruluğu gösterilmiştir. Ardından, MTF hesabını etkileyecek değişkenleri araştırmak için deney düzenekleri hazırlanmıştır. Görüntüye bağlı değişkenleri incelemek için; kolimatör sistemi ile ideal yarım ay hedef ve ideal ısı kaynak (kara cisim) kullanılarak oluşturulan test ortamında kontrollü deney yöntemi ile sonuçlar alınarak yorumlanmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan alt yapıların etkilerini araştırmak için ise farklı özellikte kolimatör sistemleri kullanılarak ve ısı kaynak farklı sıcaklıklarda ayarlanarak sonuçlar alınmış ve yorumlanmıştır. Tüm bu değerlendirmelerin sonucunda; MTF hesabı için kullanılan hedefin eğim açısının, kaydedilen görüntünün çerçeve sayısının, alınan görüntüde kullanılan kesit alanının ve objektif (veya lens) ve dedektör arası mesafenin odaklı görüntüye göre ayarlı olmasının sonuçları etkilediği görülmüştür. Aynı zamanda kullanılan dedektörün ayarlı olmasının ve kolimatör sisteminin de sonuçlara doğrudan etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, sonuçları etkileyen bu değişkenlerin ön ayar olarak kaydedilebildiği hem tasarımcılar tarafından kullanılabilir hem de üretime aktarılabilir kullanıcı ara yüzünün tasarımında kullanılabilir parametreler belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 93008

Anahtar Kelimeler : Modülasyon transfer fonksiyonu, Termal objektif, Keskinlik testi

Sayfa Adedi : 65

Danışman : Prof. Dr. Hasan Şakir BİLGE

MEASUREMENT OF IMAGE SHARPNESS IN THERMAL LENSES

(M. Sc. Thesis)

Zehra DERTLİ EMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2021

ABSTRACT

Production of imaging systems include measurement and testing of parameters that is affecting image quality. MTF (Modulation Transfer Function) calculation is used to measure the sharpness in vision systems. The measurements should be made at the detector and lens level, which are subcomponents of the imaging system. In this study, MTF calculation is done using the "Slanted Edge Method" based on the ISO 12233 standard during production of thermal lenses, which are a subcomponent of the thermal imaging system. Firstly, the mathematical accuracy of the algorithm designed for MTF calculation was shown by comparing it with a user interface that has been validated and in-use. To examine the variables related to the image; the results were obtained with the controlled test method in the test environment created using the half-moon target and the thermal source (black body) with the collimator system. To investigate the effects of the infrastructures used in the experimental setup, the results were obtained by using different collimator systems and thermal source which is adjusted at different temperatures. As a result; it was seen that the angle of the target used for MTF calculation, the number of frame the recorded image, the cross-sectional area used in the taken image and the focused distance between the lens and the detector are affect the MTF calculation. It was observed that the detector calibration and the collimator system had a direct effect on the results. In this context, user interface parameters has been specified for both the designers and operators.

Science Code : 90521

Key Words : Modulation transfer function, Thermal objective, Sharpness test

Page Number : 65

Supervisor : Prof. Dr. Hasan Şakir BİLGE

TEŞEKKÜR

Tez yazım süreci başta olmak üzere çalışmam boyunca tecrübesiyle bana destek olan ve yönlendiren danışmanım Prof. Dr. Hasan Şakir BİLGE'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca konuyla ilgili teknik bilgisiyle beni yönlendiren, hazırlanan deney düzeneklerinde ölçümlerin alınması için yardımcı olan “ASELSAN” bünyesinde görev yapan Gökhan CÜYLAN'a verdiği katkılardan dolayı çok teşekkür ederim. Bununla birlikte tez çalışmam boyunca gerçekleştirilen deneyler için düzeneklerin hazırlanması, kurulması ve ölçüm alınması konusunda destek veren “ASELSAN” bünyesinde görev yapan Burcu BARUTÇU ÖZTÜRK ve Burak YILMAZ'a da katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yanımda olan annem Rukiye DERTLİ, kardeşim Osman DERTLİ, eşim Ozan EMİR'e desteklerini her zaman hissettirdikleri ve gösterdikleri sabır için teşekkür ederim.

Bu çalışmalarda kullanılan alt yapılar “ASELSAN MGEO” tarafından sağlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Termal Görüntüleme Sistemleri	5
2.1.1. Objektif	6
2.1.2. Dedektör	7
2.1.3. Görüntü normalizasyonu	9
2.2. Modülasyon Transfer Fonksiyonu	10
2.2.1. Yarık yöntemi.....	12
2.2.2. Çubuk desen yöntemi	12
2.2.3. Eğik kenar yöntemi	13
2.3. Kolimatör sistemi	15
3. YÖNTEM VE MATERYALLER	19
3.1. Eğik Kenar Yöntemi ile MTF Ölçümü	19
3.1.1. Hesaplamalar öncesi yapılan görüntü düzeltmeleri	21
3.1.2. Kenar dağılım fonksiyonunun (ESF) hesaplanması	25
3.1.3. Çizgi dağılım fonksiyonunun (LSF) hesaplanması	26

	Sayfa
3.1.4. MTF ölçümünün hesaplanması	26
3.2. Ölçüm Matematiğinin Doğrulama Çalışması	27
3.2.1. Deney düzeneğinin hazırlanması	27
3.2.2. Sonuçların alınması.....	28
3.3. Termal Lenste Eğik Kenar Yöntemi Kullanılarak MTF Ölçümü Ve Ölçüm Sonucunu Etkileyen Parametreler	31
3.3.1. Deney düzeneğinin hazırlanması	32
3.3.2. Kesit alanı parametresinin etkisinin görülmesi için ölçümlerin yapılması	35
3.3.3. Hedef eğimi parametresinin etkisinin görülmesi için ölçümlerin yapılması	36
3.3.4. Kaydedilen çerçeve sayısı parametresinin etkisinin görülmesi için ölçümlerin yapılması	38
3.3.5. Dedektör ve lens arası mesafe parametresinin etkisinin görülmesi için ölçümlerin yapılması	39
3.3.6. Ölçüm sırasında kullanılan dedektörün etkisi	41
3.4. Dedektör İçin Görüntü Normalizasyonu İşleminin MTF Ölçüm Sonuçlarına Etkisi.....	42
3.5. Kolimatör Sisteminin MTF Ölçümüne Etkisi.....	44
3.5.1. Farklı kolimatör sistemlerinden farklı kara cisim farksal sıcaklığı altında görüntülerin alınması.....	45
3.5.2. Farklı kolimatör sistemlerinden farklı kara cisim farksal sıcaklığı altında alınan görüntülere ait mtf sonuçlarının karşılaştırmalı grafiklerinin elde edilmesi	49
3.6. Gerçekleştirilen Deneylerin Değerlendirilmesi ve Kullanıcı Ara Yüzünde Yer Alması Gereken Parametrelerin Belirlenmesi	53
3.6.1. Tasarımcılar için kullanıcı ara yüzü.....	53
3.6.2. Üretim personeli için kullanıcı ara yüz.....	55
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	57

Sayfa

KAYNAKLAR 61

ÖZGEÇMİŞ 65



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Odaklı Mesafeden Uzaklığa Göre Sapma Çizelgesi.....	41
Çizelge 3.2. Görüntü Normalizasyonuna ve Odaklı Olmasına Göre Sapma Çizelgesi ..	44
Çizelge 3.3. Kara Cisim Farksal Sıcaklık Değişim Yönüne Göre MTF Değişimi	50



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Termal Görüntünün Monitöre Aktarımı	5
Şekil 2.2. a) Soğutmalı Dedektörde Foton Algılanması b) Soğutmasız Dedektörde Fotonlar	8
Şekil 2.3. a) Kalibrasyonsuz Görüntü b) Kalibrasyonlu Görüntü.....	10
Şekil 2.4. Kolimatör Dıştan Görünüm	15
Şekil 2.5. Kolimatör İç Yapısı	16
Şekil 2.6. Eksen Üstü Kolimatör Yapısı	16
Şekil 2.7. Eksen Dışı Kolimatör Yapısı	17
Şekil 3.1. a) Ham Görüntü, Kırmızı Kutu: Kullanılacak Kesit Alanının Sınırları b) Kullanılacak Kesit Alanı	20
Şekil 3.2. MTF Ölçümü İçin Uygulanan Adımların Akış Şeması.....	21
Şekil 3.3. Siyah-Beyaz Geçişinin Piksel Değerleri ile Gösterimi.....	23
Şekil 3.4. Enterpolasyon Uygulanmış Görüntüdeki Geçişin Piksel Değeri ile Gösterimi	24
Şekil 3.5. a) Enterpolasyon Uygulanmış Eğik Görüntü b) Gradyan Yöntemi ile Düzeltilmiş Görüntü.....	24
Şekil 3.6. Örnek Kenar Dağılım Fonksiyonu (ESF) Grafiği	25
Şekil 3.7. Örnek Çizgi Dağılım Fonksiyonu (LSF) Grafiği.....	26
Şekil 3.8. Örnek Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF) Grafiği	27
Şekil 3.9. Deney Düzenegi#1 - Ölçüm Matematiğinin Doğrulama Çalışması İçin Hazırlanan Düzenek.....	28
Şekil 3.10. Deney Düzenegi#1 – Dikey Hedef İle Kaydedilen Görüntü ve Hesaplama İçin Kullanılacak Kesit Alanı.....	29
Şekil 3.11. Deney Düzenegi#1’den Alınan Dikey Hedef Görüntüsünün MTF Sonuçları	30
Şekil 3.12. Deney Düzenegi#1 – Yatay Hedef İle Kaydedilen Görüntü ve Hesaplama İçin Kullanılacak Kesit Alanı.....	30

Şekil	Sayfa
Şekil 3.13. Deney Düzeneği#1'den Alınan Yatay Hedef Görüntüsünün MTF Sonuçları	31
Şekil 3.14. Deney Düzeneği#2 – Ölçüm Parametrelerinin Etkisini Ölçmek İçin Hazırlanan Düzenek a) Kolimatör Sistemi b) Platform Hareketini Sağlayan Mekanik c) Dedektör – Lens Arası Mesafenin Ayarlandığı Mekanik d) Gonyometre e) Lens f) Dedektör g) Elektronik Kart Takımı....	33
Şekil 3.15. Dedektörden Alınan Ham Görüntü - Kırmızı Çerçeveli Bölge Hedefin Görüntüsü.....	35
Şekil 3.16. Kullanılan Kesit Alanına Göre Kaydedilen Görüntüler ve Hesaplama İçin Kullanılan Parçalar a) Kesit Alanı: 10x140 b) Kesit Alanı: 26x140 c) Kesit Alanı: 30x140 d) Kesit Alanı: 40x140 e) Kesit Alanı: 50x140.....	36
Şekil 3.17. Kullanılan Kesit Alanına Göre MTF Sonuçlarının Karşılaştırma Grafiği....	36
Şekil 3.18. Hedef Eğimine Göre Kaydedilen Görüntüler ve Hesaplama İçin Kullanılan Parçalar a) Hedef Eğimi: 0,8° b) Hedef Eğimi: 6,58° c) Hedef Eğimi: 7,12°.....	37
Şekil 3.19. Hedef Eğimine Göre MTF Sonuçlarının Karşılaştırma Grafiği	38
Şekil 3.20. Sahne Sayısına Göre Kaydedilen Görüntüler ve Hesaplama İçin Kullanılan Parçalar a) Çerçeve Sayısı: 3 b) Çerçeve Sayısı: 5 c) Çerçeve Sayısı: 10 d) Çerçeve Sayısı: 50 e) Çerçeve Sayısı: 100	39
Şekil 3.21. Çerçeve Sayısına Göre MTF Sonuçlarının Karşılaştırma Grafiği.....	39
Şekil 3.22. Lens-Dedektör Arası Odaklı Mesafeye Göre Kaydedilen Görüntüler ve Hesaplama İçin Kullanılan Parçalar a) Mesafe: 0 µm b) Mesafe: +10 µm c) Mesafe: -10 µm d) Mesafe: +20 µm e) Mesafe: -20 µm	40
Şekil 3.23. Lens-Dedektör Arası Odaklı Mesafeye Göre MTF Sonuçlarının Karşılaştırılması	41
Şekil 3.24. Teorik MTF Verisi ile Ölçülen MTF Verisinin Karşılaştırma Grafiği.....	42
Şekil 3.25. a) Normalizasyon Uygulanmadan Önceki Görüntü b) 1 Nokta Normalizasyon Uygulanan Odaksız Görüntü c) 1 Nokta Normalizasyon Uygulanan Odaklı Görüntü d) 1 Nokta ve 2 Nokta Normalizasyon Uygulanan Odaksız Görüntü e) 1 Nokta ve 2 Nokta Normalizasyon Uygulanan Odaklı Görüntü.....	43
Şekil 3.26. Görüntü Normalizasyonu Uygulanma Durumuna Göre Hesaplanan MTF Sonuçları	44

Şekil	Sayfa
Şekil 3.27. Deney Düzeneği#3 – Kullanılan Kolimatörün Etkisini Ölçmek İçin Hazırlanan Düzenek a) Test Edilecek Cihazdan Görüntü Almak İçin Hazırlanan Alt Yapı b) 1 metre uzunluğundaki f/5 sayısı değerine sahip kolimatör c) 1,5 metre uzunluğundaki f/5 sayısı değerine sahip kolimatör d) 3 metre uzunluğundaki f/10 sayısı değerine sahip kolimatör	46
Şekil 3.28. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.24.b’de Belirtilen Kolimatörden Alınan Görüntüler Kara Cisim Farksal Sıcaklığı: a) 0°C b) 2°C c) -2°C d) 4°C e) -4°C f) 6°C g) -6°C h) 10°C ı) -10°C	47
Şekil 3.29. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.26.c’de Belirtilen Kolimatörden Alınan Görüntüler Kara Cisim Farksal Sıcaklığı: a) 0°C b) 2°C c) 2°C d) 6°C	48
Şekil 3.30. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.26.d’de Belirtilen Kolimatörden Alınan Görüntüler Kara Cisim Farksal Sıcaklığı: a) 0°C b) 2°C c) 2°C d) 6°C	49
Şekil 3.31. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.27.b’de Belirtilen Kolimatörden Farklı Kara Cisim Farksal Sıcaklıklarında Alınan Görüntülerin Karşılaştırılması	50
Şekil 3.32. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.27.c’de Belirtilen Kolimatörden Farklı Kara Cisim Farksal Sıcaklıklarında Alınan Görüntülerin Karşılaştırılması	51
Şekil 3.33. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.27.d’de Belirtilen Kolimatörden Farklı Kara Cisim Farksal Sıcaklıklarında Alınan Görüntülerin Karşılaştırılması	51
Şekil 3.34. Deney Düzeneği#3 - Kara cisim Farksal Sıcaklığı 2°C İçin Şekil 3.27.b., Şekil 3.27.c ve Şekil 3.27.d Kolimatörlerinden Alınan Görüntülerin MTF Sonuçlarının Karşılaştırılması	52
Şekil 3.35. Deney Düzeneği#3 - Kara cisim Farksal Sıcaklığı 4°C İçin Şekil 3.27.b., Şekil 3.27.c ve Şekil 3.27.d Kolimatörlerinden Alınan Görüntülerin MTF Sonuçlarının Karşılaştırılması	52
Şekil 3.36. Deney Düzeneği#3 - Kara cisim Farksal Sıcaklığı 6°C İçin Şekil 3.27.b., Şekil 3.27.c ve Şekil 3.27.d Kolimatörlerinden Alınan Görüntülerin MTF Sonuçlarının Karşılaştırılması	53
Şekil 3.37. Tasarımcılar İçin Hazırlanacak Kullanıcı Ara Yüzünde Bulunması Gereken Parametreler a) Ölçüm Yapılacak Objektif İçin Bilgi Girişi b) Ölçümde Kullanılan Dedektör İçin Bilgi Girişi c) Kullanılan Kolimatör Sistemi İçin Bilgi Girişi d) Kaydedilen Görüntü Özellikleri İçin Bilgi Girişi e) Kullanılan Mekanik Parçalar İçin Bilgi Girişi f) MTF Hesaplama Butonu g) Parametreleri Kaydetme Butonu	55

Şekil**Sayfa**

Şekil 3.38. Üretim Personeli İçin Hazırlanacak Kullanıcı Ara Yüzünde Bulunması Gereken Parametreler a) Ölçüm Yapılacak Objektif İçin Seçim Alanı b) Ölçümde Kullanılan Dedektör İçin Seçim Alanı c) Kullanılan Kolimatör Sistemi İçin Seçim Alanı d) Kullanılan Mekanik Parça Numaraları İçin Seçim Alanı e) MTF HESAPLA Butonu	56
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

mm

Milimetre uzunluk birimi

μm

Mikrometre uzunluk birimi

f/#

Lens açıklığı

çç/mm

1 milimetreye düşen çizgi çifti

Kısaltmalar

Açıklamalar

FPA

Odak Düzlem Dizini

LWIR

Uzun Dalga Kızıl Ötesi

MDT

Ayırt Edilebilir En Küçük Sıcaklık

MRT

Çözülebilir En Küçük Sıcaklık

MTF

Modülasyon Geçiş Fonksiyonu

MW

Orta Dalga

MWIR

Orta Dalga Kızıl Ötesi

NEDT

Gürültü Eş Değer Sıcaklık Farkı

NUC

Düzensizlik Düzeltmesi

SW

Kısa Dalga

1. GİRİŞ

Sıcaklığı mutlak sıfırın yani -273 santigrat derecenin üzerinde olan nesneler, termal (ısı) enerji yaymaktadırlar. Bu ısı enerji, elektromanyetik spektrumdaki kızıl ötesi ($1\mu\text{m}$ - $1000\mu\text{m}$ dalga boyları arasında) dalga boyunun küçük bir kısmı olan $1\mu\text{m}$ ile $14\mu\text{m}$ dalga boyları arasında yayılmaktadır ve termografide üç farklı bölgede kategorize edilmektedir. Bu kategorilerden ilki, görünür bölgenin çok küçük bir kısmını da içine alarak $0,9-1,7\mu\text{m}$ dalga boyları arasında görüntülemeyi sağlayan kısa dalga boyudur (SW – Short Wave). Diğer ikisi ise $8-14\mu\text{m}$ aralığı uzun dalga boyu (LW – Long Wave), $3-5\mu\text{m}$ aralığı orta dalga boyu (MW – Mid Wave) şeklindedir [1].

Termal görüntüleme sistemleri, özellikle uzun ve orta dalga boylarında cisimlerden yayılan ısı enerjinin algılanması ve yorumlanmasını sağlamaktadırlar. Bu sayede tarım, jeolojik araştırmalar, otomotiv, uzay araştırmaları, güvenlik sistemleri, tıbbi uygulamalar, askeri ve savunma sistemleri ve daha birçok alanda insan gözünün algılayabildiği görünür bölgenin ötesinde de gözlemler ve çalışmalar yapılabilmesini sağlamaktadırlar [2-3].

Termal görüntüleme sistemleri, dedektör ve mercek takımı olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadırlar. Bu iki bileşen, dalga boyu ve kullanım amacına uygun olarak birbiriyle uyumlu şekilde seçilerek bir araya getirilmektedirler. Bu seçim ve bir araya getirme sırasında hem tüm sistemin hem de alt bileşenlerin görüntü performansının ölçülmesi gerekmektedir.

Performans ölçümü için kullanılan başlıca yöntemler; çözünürlük, gürültü eşdeğeri farksal sıcaklığı (Noise Equivalent Differential Temperature - NEDT), modülasyon transfer fonksiyonu (Modulation Transfer Function - MTF), minimum çözünümlenebilir sıcaklık (Minimum Resolvable Temperature - MRT) ve minimum tespit edilebilir sıcaklık (Minimum Detectable Temperature - MDT) şeklindedir. Bu yöntemlerden biri olan ve Bölüm 2.2.'de ayrıntılı olarak açıklanan MTF, hem tüm termal sistem için hem de alt bileşenler için kullanılabilen bir görüntü performansı ölçütüdür ve görüntünün aslına sadık bir şekilde ne kadar iyi yeniden üretilebileceği ve üretilen görüntünün keskinliği hakkında bilgi vermektedir [4].

Bu çalışmada, termal görüntüleme sisteminin alt bileşeni olan merceklerin performans ölçümü için eğik kenar yöntemi ile modülasyon transfer fonksiyonu hesaplaması

kullanılmıştır. Merceklerin seri üretim alt yapısında kullanımına yönelik bir kullanıcı arayüz programı tasarlanması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, kullanıcı arayüzünde bulunması gereken veya önceden tanımlanması gereken parametreler, hazırlanan deney düzenekleri kullanılarak yapılan ölçümler ile araştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında Bölüm 2.1.'de termal görüntüleme sistemi ve alt bileşenleri hakkında temel oluşturacak genel bilgiler paylaşılmıştır. Teknik tasarım ayrıntılarının da paylaşıldığı bu bölümde literatürde bulunan örneklerden faydalanılmıştır. Bölüm 2.2.'de modülasyon transfer fonksiyonunun kullanım yerleri, hesaplama için kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Bu çalışmada kullanılacak olan eğik kenar yöntemi için literatürde yer alan çalışmalar paylaşılmıştır. Bölüm 2.3.'te ise çalışmanın ilerleyen bölümlerinde hazırlanacak olan deney düzeneklerinin anlaşılması için, deney ortamı olarak kullanılan kolimatör sistemleri anlatılmıştır.

Kullanılan yöntem ve materyaller Bölüm 3.'te detaylandırılmıştır. Bölüm 3.1.'de eğik kenar yöntemi kullanılarak modülasyon transfer fonksiyonunun hesaplanması için kullanılan teorik alt yapı, matematiksel formüller ve algoritma şeması paylaşılmıştır. Bölüm 3.2.'de ise Bölüm 3.1.'de anlatılan teorik alt yapının hazırlanan deney düzeneği ile doğrulanması anlatılmıştır. Bölüm 3.3.'te hazırlanan deney düzeneği ile eğik kenar yöntemi ile MTF ölçümü sırasında kullanılacak olan görüntü kaydına ait sahne sayısının ve hesaplama için kullanılacak kesit alanının etkisi araştırılmıştır. Kullanılan yarım ay hedefin eğim açısı ve dedektör – lens arası odaklı mesafenin etkisi araştırılmıştır. Bunlara ek olarak sonuçlar analiz edilirken; kullanılan dedektörün kalibrasyonlu olmamasının beklenenden uzak sonuçlar elde edilmesine sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, dedektör kalibrasyonunun yani görüntü normalizasyonunun yapılmış olmasının etkisini araştırmak için Bölüm 3.4.'te anlatılan deney düzeneği hazırlanmıştır ve ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir.

Kullanılan ortamın yani kolimatör sisteminin ve ısı kaynak olan kara cisim sıcaklığının etkisinin araştırıldığı deneyler Bölüm 3.5.'te gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile aynı dedektör ve objektif bütünü için kara cisim farksal sıcaklığı değişmeksizin, farklı $f/\#$ değerlerine sahip kolimatörlerde ölçümler alınmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Ardından bir kolimatör sisteminde, sadece kara cisim farksal sıcaklığı değiştirilerek ölçümler alınmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Bölüm 3.'te yapılan tüm bu deneylerin sonuçları Bölüm 3.6.'da ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Yapılan deneylerde alınan sonuçların ışığında, termal objektiflerde eğik kenar yöntemi kullanılarak MTF ölçümü sırasında sonucu etkileyebilecek parametreler belirlenmiştir. Bölüm 4'te tasarlanan kullanıcı ara yüzü, belirlenen bu parametrelere göre hem tasarımcıların hem de üretim personelinin etkin kullanabilmesine göre şekillendirilmiştir.



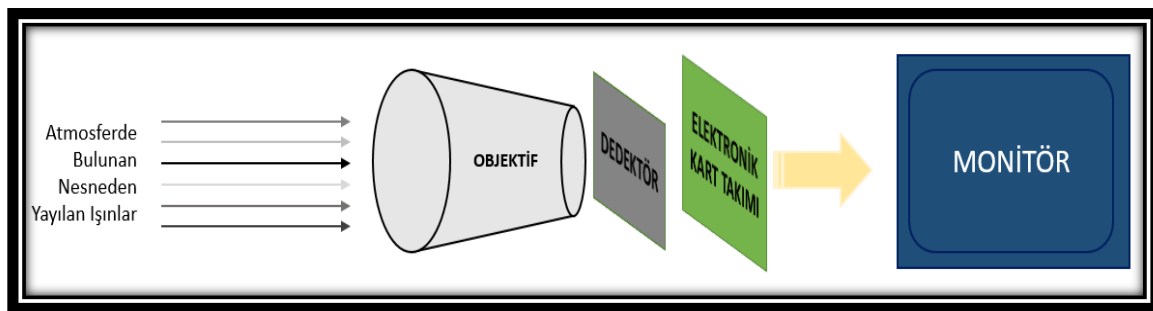
2. GENEL BİLGİLER

Termal objektiflerde görüntü keskinliğinin ölçülmesi için yapılan çalışmaların anlaşılabilmesi için; termal görüntüleme sistemlerinin, keskinlik ölçümü için kullanılabilecek yöntemlerin ve araçların anlaşılması gerekmektedir. Bu bağlamda bu bölümde konuyla ilgili temel tanımlamalar ve açıklamalar yapılacaktır.

2.1. Termal Görüntüleme Sistemleri

Kızılötesi dalga boyunda cisimlerin sıcaklıklarını algılayarak görüntülemeyi sağlayan sistemlere termal görüntüleme sistemleri denir. İlk kez 1930 yılında geliştirilen ve günümüzde de gelişen tasarımlarla askeri, tıbbi vb. alanlarda kullanılan bu sistemler, kullanılacak dedektöre bağlı olarak $3\mu\text{m} - 5\mu\text{m}$ orta dalga boyu, $7\mu\text{m}-14\mu\text{m}$ arası uzak dalga boyunda çalışırlar ve bu sayede kısa dalga boyunun ötesinde de görebilmemizi sağlarlar [5].

Termal görüntünün kaynağı Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi atmosferde bulunan nesnelerden yayılan ışınlardır, yani ışımadır. Bu ışıma ilk olarak termal sistemde bulunan mercecek takımına (objektif) gelir ve odaklandıktan sonra dedektöre ulaşır. Algılama işlemini yapan dedektör kullanılan elektronik kart takımı sayesinde görüntünün işlenmesini ve oluşturulmasını sağlar [6].



Şekil 2.1. Termal Görüntünün Monitöre Aktarımı

Tasarlanmak istenen termal görüntüleme sisteminin öncelikle gereksinim özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu gereksinimler doğrultusunda alt parçaların tasarlanıp uygun konumlarda bir araya getirilmesi gerekmektedir. Belirlenen gereksinim özelliklerinin tasarımlar sonrasında uygunluğunun test edilerek ölçülmesi ve değerlendirilmesi

gerekmektedir. Bu ölçüm ve değerlendirmeler hem termal sistem düzeyinde hem de alt parçalar olan dedektör ve mercek düzeyinde yapılmaktadır.

Doğrusal zamanda bağımsız sistemler olan termal görüntüleme sistemlerinde görüntüleme gereksinimlerinin testleri, görüntünün odaklı, net ve keskin olması parametreleri temel alınarak yapılabilmektedir. Görüntünün odaklı ve net olması histogram grafiği ile belirlenebilmektedir. Bir sonraki parametre olan keskinlik ise odaklı ve net görüntünün modülasyon transfer fonksiyonu (MTF) ölçümü ile sağlanmaktadır [6-8].

2.1.1. Objektif

Üzerine gelen ışımanın odaklanmasını sağlamak için tasarlanan mercekler uygulama alanlarına ve çalışması gereken dalga boylarına göre uygun malzeme kullanılarak üretilmektedirler. Mercek, dolayısıyla mercek yapımında kullanılan malzeme; termal sistemin çalışması gereken kızılötesi dalga boyunda geçirgen olmalıdır. Merceğin tek başına veya başka mercek(ler) ve/veya ayna(lar) ile birlikte mekanik parçalarla bir bütün hale gelmesi ile objektif tasarlanmaktadır. Kızılötesi objektiflerde, tasarlanan sisteme bağlı olarak çevreden gelen olumsuz etkileri algılayıcı olan dedektöre gitmeden önce engelleyebilmek için pencere, filtre veya kubbe gibi ek tasarımlar da kullanılabilir [9].

Objektif tasarımları ışının yönlendirme şekline göre üçe ayrılmaktadır; yansıtıcı (reflective), kırıcı (refractive) ve katadioptrik (catadioptric). Yansıtıcı objektif sistemlerinde ışının optik yolu sadece ayna yapıları kullanılarak değiştirilmektedir. Yansıtıcı sistemlerde, sistem uzunluğu odak uzaklığından kısa olabileceği boyutsal avantaj sağlanmaktadır; fakat aynalar konumları itibarıyla birbirlerinin görüşünü kapatabilmektedir. Kırıcı sistemlerde ise optik sistemin çalışma dalga boyunda geçirgenliğe sahip mercek ve prizma yapıları kullanılmaktadır. Geniş görüş açısı avantajı sağlayan kırıcı sistemler ise merceklerden yansıyan ışınlardan dolayı enerji kaybı oluşmaktadır. Katadioptrik sistemler ise hem mercek ve prizma yapılarını hem de ayna yapılarını kullanmaktadır. Böylece yansıtıcı ve kırıcı sistemlerin avantajlarını ve dezavantajlarını kontrol edebilmeyi sağlamaktadır [6].

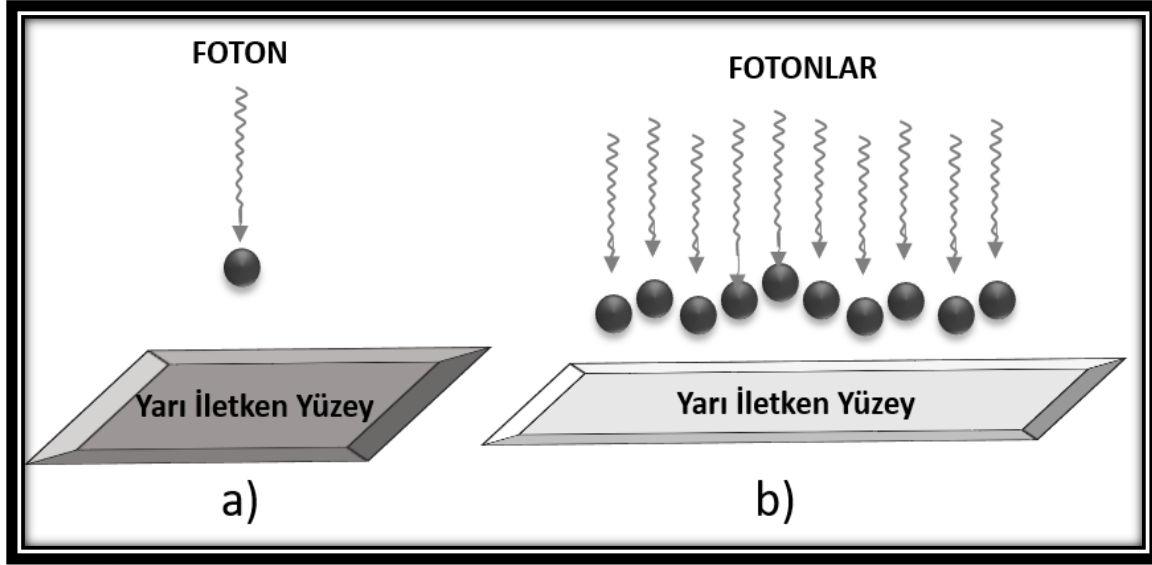
Objektif sistemlerinde kullanılan motorize yapılar, görüntüleme sisteminin odak ve görüş açısı parametrelerinin kontrol edilebilmesini sağlamaktadır. Odaklama için kullanılan motorize yapı sayesinde, dedektör ile birlikte bir sistem oluşturulduğunda, dedektör üzerinde

algılanacak görüntünün en iyi odaklı olduğu noktaya göre merceklerin konumu belirlenebilmektedir. Görüş açısının ayarlanması için kullanılan motorize yapı sayesinde ise, tasarlanan görüntüleme sisteminin birden fazla görüş açısı için ayarlanabilir ve kullanılabilir olması sağlanabilmektedir [10].

Objektif tasarımı, kullanılacak sistemin gereksinim özelliklerine bağlı olarak belirlenen parametrelere göre yapılmaktadır. Bu parametrelerden biri olan f sayısı, objektifin ışık alma seviyesini objektife ait açıklık ve etkin odak uzaklığı değerlerinin oranıyla hesaplanır. Dolayısıyla objektifte istenen f sayısına bağlı olarak; etkin odak uzaklığı ve objektifin ışın gelen yüzeyinin çapı belirlenebilmektedir [11].

2.1.2. Dedektör

Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde kullanılan dedektörler temel olarak ikiye ayrılmaktadır; foton dedektörler ve bolometrik dedektörler. Foton dedektörler Şekil 2.2.a'da gösterildiği gibi; yarıiletken malzemeden üretilen yüzeye gelen ışının yayılmasına veya soğurularak elektrik iletkenliğinin sağlanabilmesine bağlı olarak enerji üretilmesine dayanan bir çalışma prensibine sahiptir. Soğutmalı dedektör üzerine düşen bir fotonla uygun elektrik sinyali üretebilme olanağına sahiptir. Çok hızlı tepki verebilen foton dedektörlerinin çalışması için soğutucu yapılara ihtiyaç duyulmaktadır. Bolometrik dedektörlerin çalışma prensibi ise ısıya bağlı değişen direnç yapılarına dayanmaktadır. Şekil 2.2.b'de gösterildiği gibi yarı iletken yüzeye gelen ışının sıcaklığına bağlı olarak değişen direnç yapısı elektriksel olarak algılanmaktadır. Bu elektriksel sinyalin oluşturulabilmesi için dedektör üzerine tek foton gelmesi yeterli değildir, fotonlardan oluşan yüklü bir grup gelmesi gerekmektedir. Bolometrik dedektörler soğutma sistemine ihtiyaç duymadan oda koşullarında çalışabilmektedirler.



Şekil 2.2. a) Soğutmalı Dedektörde Foton Algılanması b) Soğutmasız Dedektörde Fotonlar

Soğutmalı dedektörlerde, termal görüntünün yanı sıra var olan termal gürültüyü, görüntünün sinyal seviyesinin altına çekebilmek için kriyojenik soğutma yapıları kullanılmaktadır. Soğutma yapıları sayesinde, görüntülenen sahnedeki sıcaklık farklılıklarının sinyal seviyesindeki duyarlılığını belirten termal karşıtlık bu dedektörlerde yüksek olmaktadır. Termal karşıtlığın yüksek olması, hedef görüntünün arka planı ile hedef görüntü arasındaki sıcaklık farkı az olsa dahi hedefin ayırt edilebilmesini sağlamaktadır. Bu bağlamda soğutmalı dedektörler, orta dalgaboyu kızılötesi (Midwave Infrared – MWIR) bandında yüksek karşıtlıklı görüntüler elde edilebilmektedir. Bununla birlikte yüksek dalgaboyu kızılötesi (Longwave Infrared – LWIR) bandın da görüntüleme yapılabilir.

Bolometrik yani soğutmasız dedektörlerin temel yapısı, yarı iletken üzerine yerleştirilen sıcaklık katsayısı yüksek olan küçük dirençler şeklindedir. Aktif çalışma sırasında ısı dengenin bozulmaması için, yarı iletken yapının ısı kapasitesi düşük olmalı ve iyi seviyede termal izolasyon sağlayabilmelidir. LWIR bandında görüntüleme yapan sistemlerde tercih edilen bolometrik dedektörler hem maliyet olarak daha ucuz hem de kullanım ömürleri daha uzundur [12].

Görüntüleme sistemlerinde, kullanım amacına göre soğutmalı veya soğutmasız dedektörler tercih edilebilmektedir. Uzun menzillerde görüntüleme yapan sistemlerde, soğutmasız dedektör kullanılırsa objektifin boyut ve maliyeti artacaktır. Aynı zamanda soğutmalı dedektörlerde termal karşıtlık hassasiyeti de daha yüksektir. Bundan dolayı uzun menzilli ve

yüksek karışıklık hassasiyeti beklentisi olan sistemlerde soğutmalı dedektörler tercih edilmektedir. Uzun süre çalışması gereken, hafif ve küçük olması gereken sistemlerde ise bolometrik yani soğutmasız dedektörler tercih edilmektedir [13].

2.1.3. Görüntü normalizasyonu

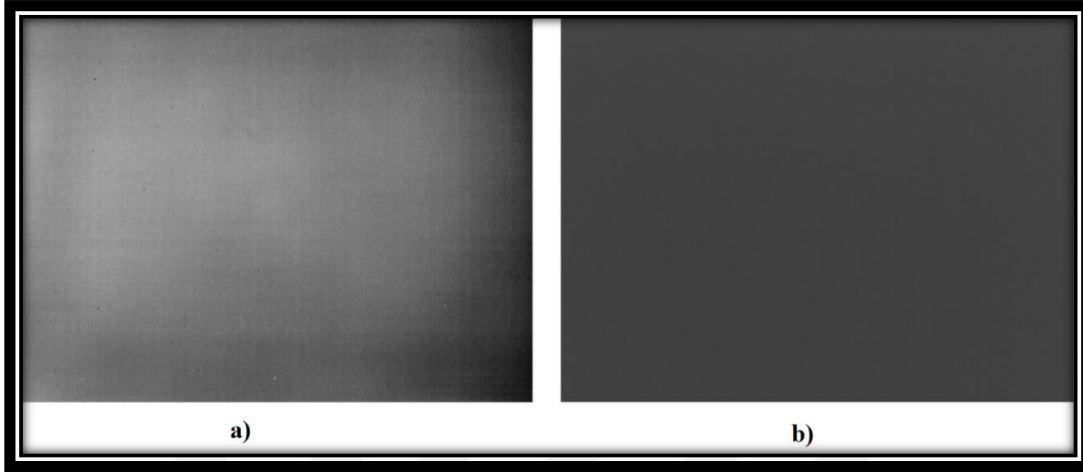
Kızılötesi dedektör yüzeyini oluşturan odak düzlemi dizilerinde (Focal Plane Array - FPA) kullanılan yarı iletken malzemeler tamamen homojen yapıda olamamaktadır. Piksellerin çizgisel frekansa bağlı olarak aynı sıcaklık değeri için verdikleri tepkilerin tüm dizin boyunca eş olmaması, sistemde oluşacak görüntünün kalitesini olumsuz yönde etkileyecektir. Tek tek piksellerin foto-yanıtındaki uzamsal homojen olmayanlıklar, işlenmemiş hallerinde kullanılamaz görüntülere yol açabilir. Tüm dizinin aynı sahne için eş tepkileri vermesini sağlayabilmek üzere tekdüzelik olmayan düzeltme (Nonuniformity Correction – NUC) uygulanmaktadır [14].

Dedektörün yarı iletken yapısından kaynaklanan homojensizliğe ek olarak, görüntüleme sisteminde bulunan objektifin de bu homojensizliğe etkisi bulunmaktadır. Objektif lensleri üzerine düşen ışının hepsini iletemez, bir kısmını kendi bünyesinde soğurur. Bu soğurma miktarı lens üretim malzemesine ve geometrisine bağlı olarak değişebilmektedir. Lens yüzeyinde meydana gelen bu olaylar dedektörün FPA yüzeyine düşen ışımayı ve dolayısıyla dedektör tepkisini ve homojensizliğini de etkilemektedir. Bu etkileri elimine edebilmek için tasarlanan görüntüleme sisteminin kalibre edilmesi gerekmektedir [15-16].

Görüntüleme sisteminin kalibrasyonu için kullanılan en yaygın düzeltme yöntemi referans tabanlı düzeltmedir. İki noktalı düzeltme (2 Point NUC) ise referans tabanlı düzeltme için kullanılan yöntemdir. Bu yöntem ile biri daha sıcak (örneğin 10 Derece) diğeri daha soğuk (örneğin 40 derece) olan kara cisim sahnelerinden alınan görüntüler piksel matrisi olarak kaydedilir. Bu soğuk ve sıcak sahneler, dedektör dizininde bulunan her pikselin eş sıcaklıklarda eş tepkileri verebilmeleri için kullanılan kazanç ve ofset sabit matrislerinin oluşturulmasını sağlamaktadır.

Bolometrik dedektörlerde, uzun süreli kullanımlarda dirençlere bağlı ölçüm değerlerinde kullanılan kat sayıların da kalibrasyon ihtiyacı bulunmaktadır. Bu ihtiyaca bağlı olarak görüntüleme sistemi içerisinde dedektör önüne hareket ettirilebilir bir panjur

yerleştirilebilmekte ve bu panjurdan alınan referans görüntü ile mevcut katsayılar kalibre edilebilmektedir [17]. Şekil 2.3.'te her noktası eş olan yüzeye bakan kalibrasyonlu ve kalibrasyonsuz dedektörün görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 2.3. a) Kalibrasyonsuz Görüntü b) Kalibrasyonlu Görüntü

2.2. Modülasyon Transfer Fonksiyonu

Doğrusal zamanda değişmez özellikte olan termal görüntüleme sistemlerinin tasarımlarında kaliteli bir görüntü elde edilmek için hem lens hem dedektör hem de sistem seviyesinde görüntü kalitesini etkileyen parametreler doğru ayarlanmalıdır ve her adımda tasarımlara ait kaliteyi anlamlandıracak ölçümler yapılarak tasarım parametreleri doğrulanmalıdır. MTF yani “Modülasyon Transfer Fonksiyonu”, bu ölçümlerden biridir ve görüntü keskinliği hakkında bilgi vermektedir [6,18].

Modülasyon transfer fonksiyonun iyi bir şekilde anlaşılması için öncelikle uzamsal frekans, karışıklık, dedektör için sınır frekans değeri, objektif için sınır frekans değeri tanımlarının doğru anlaşılması gerekmektedir.

Uzamsal (Çizgisel) Frekans: 1 milimetre başına düşen çizgi çifti olarak tanımlanmakta olan uzamsal frekansta, çizgi çifti ifadesi; bir siyah çizgi ve bir beyaz çizgiden oluşan çizgi dizisini temsil etmektedir. Gösterimi “çç/mm” şeklindedir.

Karışıklık: Uzamsal frekansta tanımladığımız çizgi çiftlerinden; beyaz çizginin maksimum değere ve siyah çizginin sıfır değere sahip olduğunu düşündüğümüzde, görüntü

yoğunluğunun normalize edilmesi Eş.2.1’de belirtilen karşıtlığın tanımını oluşturmaktadır ve bir görüntüdeki yoğunluk farklılıklarını ayırt etme yeteneğini ifade etmektedir.

$$Kontrast = \frac{(En\ Yüksek\ Parlaklık\ Değeri) - (En\ Düşük\ Parlaklık\ Değeri)}{(En\ Yüksek\ Parlaklık\ Değeri) + (En\ Düşük\ Parlaklık\ Değeri)} \quad (2.1)$$

Dedektör İçin Sınır Frekans Değeri: Objektiften geçerek dedektöre gelen ışınım analog bir sinyali temsil etmektedir. Dedektör üzerindeki sensör yapısı bu analog sinyalin sayısallaştırılmasını sağlamaktadır. Bu analog sinyalden dijital sinyale geçiş sırasında, doğru geçişin sağlanabilmesi ve tersine işlem yapılabilmesi için yeterince örnek alınmış olması gerekmektedir. Bu gereklilik örnekleme teorimi olarak ifade edilmektedir ve dedektör için MTF grafiğinde sınır frekans değerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu bağlamda, dedektör üzerindeki sensör yapısı üzerindeki piksellerin birbirleri arasındaki mesafe “pm” mm olarak ifade edilirse, örnekleme teoremine göre sınır frekans değeri 1/pm (çç/mm) olacaktır. Bu durumda da MTF grafiği için anlamlandırılması gereken maksimum frekans değeri Eş.2.2’de belirtildiği gibi olacaktır.

$$f_{max}(dedektör) = \frac{1}{2 \times pm} \quad (2.2)$$

Objektif İçin Sınır Frekans Değeri: Objektifi oluşturan mercek (lens) yapılarının, ışınların kırınımlarına bağlı olarak üst performans sınır bulunmaktadır. Bu sınır değeri, Eş.2.3’te belirtildiği gibi merceğin çalışma dalga boyuna ve f sayısına (f/#) bağlı olmaktadır.

$$f_{max}(objektif) = \frac{1}{(Dalga\ Boyu) \times (f/\#)} \quad (2.3)$$

Görüntüleme sisteminde bulunan her bir parçanın kendine ait bir MTF değeri vardır. Frekans tabanında düşünüldüğünde, tüm sisteme ait MTF değeri Eş.2.4’te belirtildiği gibi, alt parçalara ait MTF değerinin çarpımına eşittir.

$$MTF_{sistem} = MTF_{dedektör} \times MTF_{objektif} \quad (2.4)$$

Görüntüleme sisteminde; çizgisel çözünürlüğe bağlı MTF grafiği çıkartılırken, çözünürlük için sınır noktası; objektifin sınır noktası daha küçük ise objektifin sınır noktası, Eş.2.5’te belirtildiği gibi dedektörün sınır noktası daha küçük ise dedektörün sınır noktası seçilmelidir.

$$f_{max}(sistem) = \begin{cases} f_{max}(dedektör), & f_{max}(dedektör) < f_{max}(objektif) \\ f_{max}(objektif), & f_{max}(dedektör) \geq f_{max}(objektif) \end{cases} \quad (2.5)$$

Özetle, bir görüntüleme sistemi tarafından farklı frekanslardaki sinüs fonksiyonlarının denetlendiği genliğin veya ilgili karşılığın tarifi olarak tanımlanabilen MTF, termal görüntüleme sistemlerinin yanı sıra medikal görüntüleme sistemlerinde, fotoğraf makinelerinde, gündüz kameralarında ve uydularda da görüntü keskinliği bilgisi MTF ölçümü ile elde edilmektedir. MTF ölçümü farklı yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir. Bu yöntemler; yarık yöntemi, çubuk desen yöntemi ve kenar yöntemidir.

2.2.1. Yarık yöntemi

Yarık yöntemi ile MTF ölçümünün ilk adımı çok dar bir kesitin aydınlatılmasıyla alınan görüntünün çizgi dağılım fonksiyonunun elde edilmesidir. Çizgi dağılım fonksiyonunun Fourier dönüşümü alınarak da MTF ölçüm sonucu elde edilmektedir. Bu yöntem uygulanması sırasında, aydınlatılan açıklığa göre görüntüleme sisteminin hizalanması önemli olmaktadır. Yarık görüntüsü sayesinde çizgi dağılım fonksiyonunun doğrudan elde edilmesi avantaj sağlamakla birlikte yarık genişliğinin ölçümlerde önemli olması ve farklı yönlerde ölçüm alınmak istendiğinde ölçüm sürecinin uzaması da dezavantaj oluşturmaktadır [19-20].

2.2.2. Çubuk desen yöntemi

Çubuk desen yönteminin temelini hedef görüntünün karşılığının ölçülmesi oluşturmaktadır. Konum uzayında sinüzoidal bir dalganın periyodu olarak tanımlanan uzamsal frekansa bağlı olarak hazırlanan çubuk hedeflerden alınan görüntülerin karşılıkları ölçülmektedir. Hedefin karşılığı ile görüntüleme sistemi ile ölçülen karşılığın oranı o uzamsal frekanstaki MTF ölçüm sonucunu vermektedir. Her bir frekans için farklı çubuk hedef kullanılmasının gerekmesi ölçüm yönteminin işlem adımlarını uzatmaktadır [21-22].

2.2.3. Eğik kenar yöntemi

Eğik kenar yöntemi, keskin ve pürüzsüz kenardan gelen görüntü verisini kullanmaktadır. Bu yöntemde ISO 12233 (Çözünürlük ve Uzamsal Frekans Tepkileri) standardında da belirtilen üç temel işlem uygulanmaktadır; görüntü verilerinden bir kenar profili elde etmek, türevini

kenar yönünde hesaplamak ve bu türev dizisinin Fourier dönüşümünü hesaplamak [23]. Bu yöntemde keskin kenarlı görüntü için hedefin kullanılabileceği kolimatör sistemi ile ideal ortam sağlanabilmekte ve tek seferde alınacak görüntü ile hesaplama işlemi iteratif işlemlere ihtiyaç duymadan yapılabilir. Kolimatör sistemi bulunmayan, sistemin çalışması esnasında anlık ölçüm yapılması gereken durumlarda ise, görüntü üzerinden uygun kenar seçilerek ölçüm yapılabilir.

1997 yılında “Küresel MTF Ölçüm Yöntemi” adıyla temel olarak kenar yönteminin anlatıldığı yöntem için patent alınmıştır. Yöntem, elde edilen büyük görüntünün kenarlarının belirlenmesiyle başlar. Belirlenen her bir kenar için pencereleme işlemi uygulanır. Pencerelenen kenarların, keskinlik geçişinin ortaya çıkabilmesi için türevleri alınır ve sonuçlar frekans boyutuna çevrilir. Normalize edilen kenar sonuçlarının yatayları için ortalama alınarak yatay MTF, dikeyleri için ortalama alınarak dikey MTF hesaplanmaktadır [24].

Uyduda bulunan görüntüleme sistemleri, yörüngede hareketlidirler ve fırlatma öncesi gibi önemli zamanlarda kameraların görüntüsünde sorun olmaması için kontrol sağlanmalıdır. Bu konuyu ele alan [25] ve [26] numaralı kaynaklarda belirtilen çalışmalarda, kenar yöntemi üzerinden işlemler yapılmıştır. Hareketli ve değişken hedef dezavajları için de çözüm önerisini sunan çalışmalar kenar yönteminin verimli ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Uydu sistemlerinde faydalı olmak üzere yapılan [27] numaralı kaynakta belirtilen bir diğer çalışma ise kenar yöntemi ile yapılan MTF hesabını kullanarak görüntü keskinliğine göre o an kaydedilen fotoğraflarda iyileştirme yapılmasını sağlamaktadır. Uydu görüntülerini konu olan bir başka çalışma ise [28] numaralı kaynakta belirtilmektedir. Bu çalışmada, hem simülasyon verileri hem de gerçek veriler ile kenar yöntemi kullanılarak farklı kullanıcı ve farklı algoritmalarla sonuçlar üretilmiştir. Birbirinden bağımsız ve görüntü verisinden başka hiçbir girdinin bulunmadığı bu hesaplamalar sonucunda, hiçbirinde teorik olarak hiçbir hata olmamasına rağmen sürekli tutarlı olan bir sonuç elde edilememiştir. Bu durum, hesaplanan MTF için yöntemin tüm parametreleriyle tam anlamıyla anlaşılması gerektiğini göstermektedir.

[29], [30] ve [31] numaralı kaynaklarda belirtilen çalışmalar, kenar yöntemi uygulanırken ölçüm sırasında alınan görüntünün yeterince örneklemeye sahip, net, histogram uygulanmış, sınırlandırılmış ve odaklı olmasının önemini anlatmaktadır.

Birbirinin devamı niteliğinde olan [32] ve [33] numaralı kaynaklarda belirtilen çalışmalar, tıbbi görüntüleme cihazları için kurulan MTF ölçüm alt yapısını anlatmaktadır. Eğik kenar yönteminin kullanıldığı ölçüm metodolojisinin kullanıcı arayüzüne aktarımının ve benzer uygulamaların incelendiği tezler, termal sistemler için hedeflenen test alt yapısının tıbbi alandaki uygulaması niteliğindedir.

ISO 12233 yönteminin kullanıldığı [34] numaralı çalışmada, MTF hesabı tasarımsal optik performansı ölçmek için kullanılmıştır. Görüntü simülasyonlarına hem optik gürültüler hem de dedektör seviyesindeki homojensizlik durumu ve gürültüler yansıtılarak MTF'e etkileri araştırılmıştır.

Hazırlanan bir test ortamı yerine doğal görüntüleri kullanarak, tasarım sırasında kullanılan simülasyonlar ile kameranın sistem performansı hakkında veri elde etmeyi hedefleyen [35] kaynağında belirtilen çalışma ise doğal görüntülerde var olan kenarların, kenar filtreleme yöntemleri ile algılanmasını sağlayarak MTF hesabı eğik kenar yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Bu simülasyon görüntülerde gerçek sahne gürültüsü var olduğu için tasarım sırasında daha gerçekçi test sonuçlarının alınması hedeflenmektedir.

Lenslerin aktif olarak kullanıldığı bir diğer alan olan fotoğraf makinesi objektiflerinin de kalitesine karar vermek için MTF parametresi kullanılabilmektedir. Bu konuyu ele alan [36] numaralı kaynakta belirtilen çalışmada eğik kenar yöntemi ile farklı fotoğraf makinesi objektiflerinin MTF değerleri hesaplanmıştır ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar objektifin odak merkezinde, büyütme olmaksızın ve normal görüş açısında en iyi değerlere sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte MTF hesabında kullanılan dedektörün ve hedefin sonucu etkileyeceği açıklanmıştır.

2.3. Kolimatör Sistemi

Kolimatör optik sonsuzluk simülatörü olarak tanımlanmaktadır. Işınımı kolime etmektedir yani saçılmadan aynı doğrultuda ilerlemesini sağlamaktadır. Bu sayede, ışınının uzak mesafeden yani sonsuzdan geliyormuş gibi eşit yoğunlukta ve saçılmadan test edilecek yüzeye düşmesini sağlamaktadır.

Görüntüleme sistemlerinin üretimleri sırasında kalibrasyonları ve testleri için alt yapı olarak kolimatör sistemleri kullanılmaktadır. Bu alt yapı sayesinde görüntüleme sistemlerinde görüş açısı testi ve odaklama testleri yapılabildiği gibi MTF ölçümü de yapılabilmektedir. Aynı zamanda görüntüleme sisteminin alt elemanlarının hizalanması da yapılabilmektedir.

Kolimatör sistemlerinde, test edilecek görüntüleme sistemi için uygun kaynak bulunmalıdır. Gündüz görüntüleme sistemleri için kaynak olarak ayarlanabilen ışık kaynakları kullanılmaktadır. Termal (kızılötesi) görüntüleme sistemleri için ise kara cisim kaynağı kullanılmaktadır. Belirli bir sıcaklıkta katı madde tarafından yayılan elektromıknatıs radyasyon, kara cisim radyasyonu olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklığa bağlı olarak farklı görüntülerin oluşmasına izin veren ve nesnelerden gelen ısının gözle görünür şekilde tespit edilmesini sağlayan da bu radyasyondur. Bu bağlamda, herhangi bir nesneden gelen tüm ışığı soğuran cisimlere kara cisim adı verilmektedir.

Görüntüleme sistemi için uygun kaynağın yanı sıra, kolimatör sistemlerinde testlerde kullanılmak üzere uygun hedeflerin bulunduğu teker sistemleri bulunmaktadır. Teker sistemlerinde kullanılan hedeflere örnek olarak; MTF ölçümü için kullanılan yarım ay hedef veya farklı çizgisel frekanslarda tasarlanabilen 4 çizgi hedefler verilebilir. Şekil 2.4. ve Şekil 2.5. örnek bir kolimatör sisteminin iç ve dış yapısını göstermektedir [37].

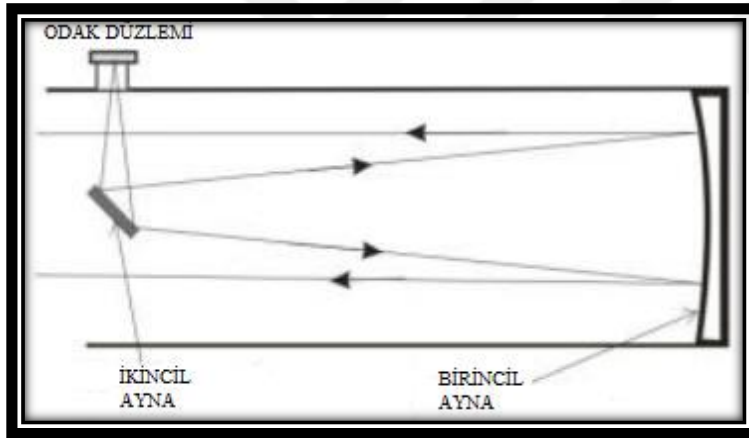


Şekil 2.4. Kolimatör Dıştan Görünüm [37]



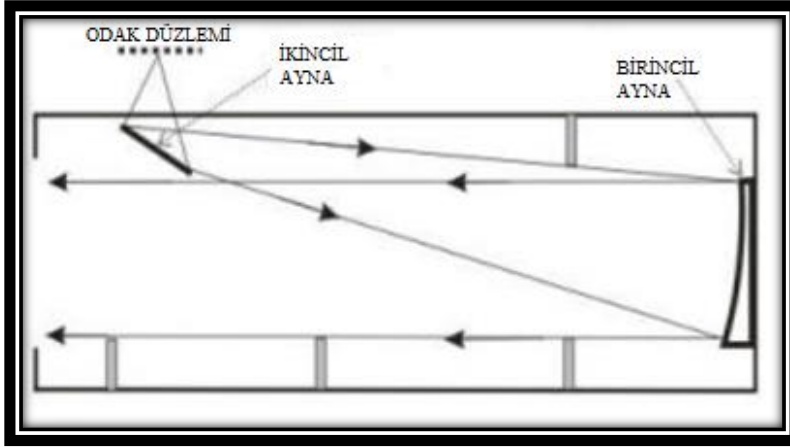
Şekil 2.5. Kolimatör İç Yapısı [37]

Kolimatörler eksen üstü (on-axis) ve eksen dışı (off-axis) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Şekil 2.6.'da belirtildiği gibi eksen üstü kolimatörlerde kaynaktan gelen ışının iletilmesini sağlayan ikincil ayna, kolimatör açıklığı ile aynı ekseninde bulunmaktadır [38] .



Şekil 2.6. Eksen Üstü Kolimatör Yapısı [38]

Eksen dışı kolimatörlerde ise Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi, kaynaktan gelen ışının iletilmesini sağlayan ikincil ayna, kolimatör açıklığının ekseninin dışında bulunmaktadır [38]. İkincil aynanın farklı konumlarda bulunması asıl yansıtıcı olan birincil aynanın fiziksel özelliklerini değiştirmektedir. Eksen üstü kolimatörlerde kullanılan aynalar daha az maliyetle daha kolay üretilen simetrik parabolik aynalardır ve kalibrasyonları daha kolay yapılmaktadır. Fakat eksen üstü kolimatörlerde açıklık ekseninde bulunan ikincil ayna görüş alanında ölü bölgenin olmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla, kolimatör açıklığında ölü bölge istenmeyen sistemler için daha maliyetli ve kalibrasyonu daha zor olmasına rağmen eksen üstü kolimatör tercih edilmektedir.



Şekil 2.7. Eksen Dışı Kolimatör Yapısı [38]



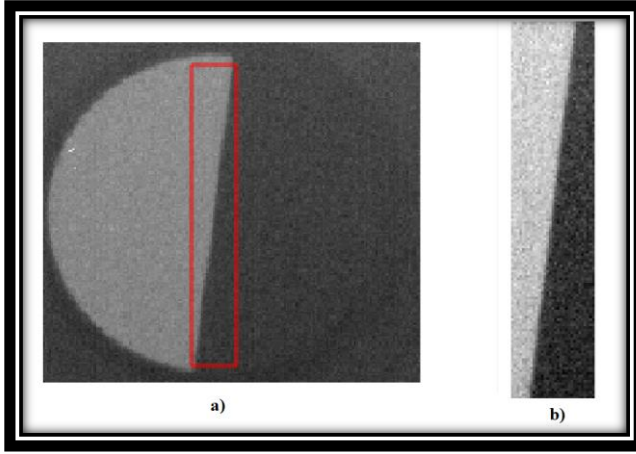
3. YÖNTEM VE MATERYALLER

Bu bölümde, termal lenslerde görüntü keskinliğini ölçmek için kullanılan eğik kenar yöntemi ile MTF ölçümünün teorik alt yapısı, ölçümü ve hesaplamayı etkileyen parametrelerin değerlendirilmesi için hazırlanan deney düzenekleri ve alınan ölçüm sonuçlarına göre kullanıcı ara yüz programında neler olması gerektiği anlatılacaktır.

3.1. Eğik Kenar Yöntemi ile MTF Ölçümü

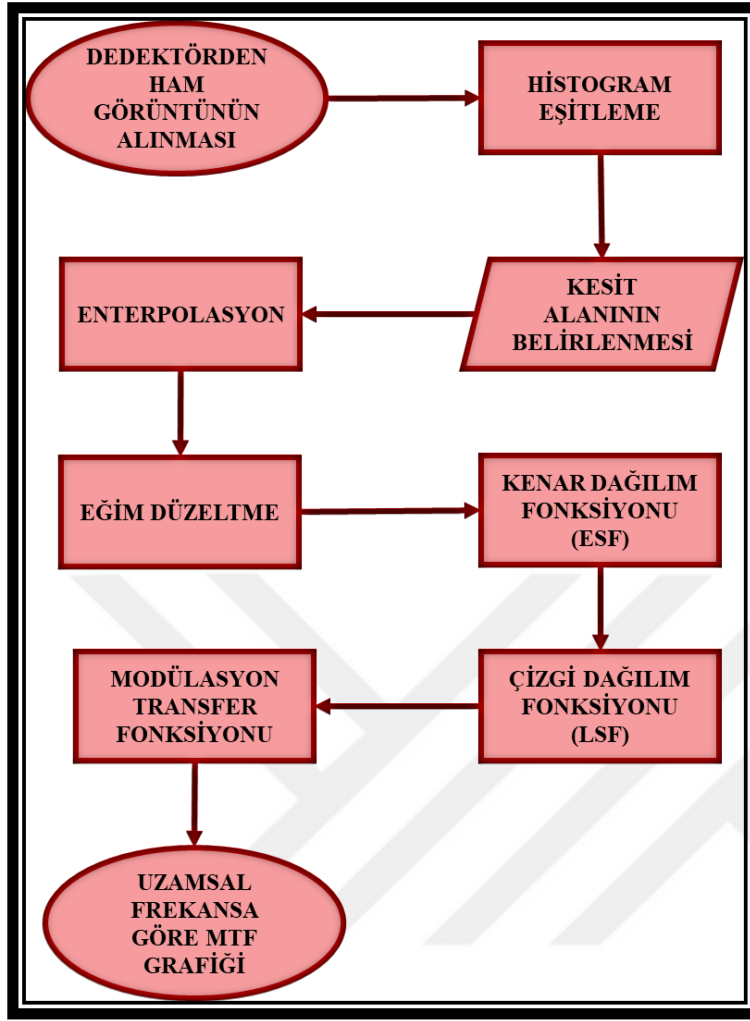
Görüntünün elektronik olarak algılandığı ve dijitalleştirilmesinin sağlandığı yapı detektördür. Dedektör üzerindeki sensör yapılarının sağlıklı olup olmamasına bağlı olarak algılanan görüntüde hatalar oluşabilmektedir. Örnekleme artırımları bu hatalar elimine edilebilmektedir. Örnekleme artırmak için, alınan görüntü parçasında hem satır sayısının artırılması gerekmektedir, hem de sütun sayısının artırılması gerekmektedir.

Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi dikey bir hedef görüntüsü düşünülecek olursa; kullanılacak sütun sayısını artırmak ve dedektörde sütun boyunca var olabilecek bir hatayı elimine edebilmek için hem geniş bir alan alınmalı hem hedef görüntüsü eğimli olmalıdır. Eğimli görüntünün düzeltilmesi için kullanılacak işlemlerde ve kenar dağılım ve çizgi dağılım fonksiyonlarının hesaplanması sırasında yapılan işlemlerde üst üste binme hatası ile karşılaşılması için eğim ve seçim alanı doğru ayarlanmalıdır [29, 39-40]. İlgili görüntüde hedef boyunca alınabilen bütün satırların seçime dahil edilmesi, kenar dağılım fonksiyonunun hesaplanması sırasında ortalama hesaplanacağı için görüntüde var olan sabit gürültünün bastırılması konusunda önemli olmaktadır.



Şekil 3.1. a) Ham Görüntü, Kırmızı Kutu: Kullanılacak Kesit Alanının Sınırları
b) Kullanılacak Kesit Alanı

Eğik kenar yöntemi ile MTF ölçümünün ayrıntılı adımları Şekil-3.2.'de gösterilmektedir. Bu adımlar göz önünde bulundurulduğunda gerçekleştirilen temel adımlar şu şekilde olmaktadır; hesaplamalar öncesi yapılan görüntü düzeltmeleri, kenar dağılım fonksiyonunun hesaplanması, çizgi dağılım fonksiyonunun hesaplanması ve MTF ölçüm değerinin hesaplanması.



Şekil 3.2. MTF Ölçümü İçin Uygulanan Adımların Akış Şeması

3.1.1. Hesaplamalar öncesi yapılan görüntü düzeltmeleri

Görüntüleme sistemine ait parametrelerin hesaplanması, alınan görüntünün kalitesi ve üzerindeki gürültü ile doğrudan ilişkili olmaktadır. Görüntüleme sistemlerinin içeriği yakalama şekli ve sistemin ışığı algılama şekli farklılık göstermektedir [41]. MTF ölçümü için alınan görüntüde, çevresel etkileri azaltabilmek ve dijital olarak daha iyi analiz edebilmek için hesaplama öncesinde alınan kesit üzerinde histogram eşitleme, enterpolasyon, eğimli açıyı düzeltme işlemleri uygulanmaktadır.

Histogram, verinin bir parçasının dağılım fonksiyonunun dağılımı olarak tanımlanabilir. Bir görüntüde, objelerin seçilebilmesi görüntünün karışıklığı ile ilgilidir. Görüntünün dağılımı düzenlenerek karışıklık artırılabilir ve objelerin ayırt edilmesi sağlanabilir. Dağılım düzenleme işlemine histogram eşitleme adı verilmektedir. Farklı histogram eşitleme

yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden olan “Birikimli Histogram Dengeleme” yöntemi [42-44] Eş.3.1 ve Eş.3.2’de belirtildiği gibi formülleştirilmektedir. Eş.3.1’de maksimum “L” değerinde gri seviyeye sahip “h” histogram dizininin “bdf(L)” birikimsel dağılım fonksiyonu hesaplanmaktadır. Eş.3.2’de ise “M” satır ve “N” sütundan oluşan bir görüntü matrisinin “L” değerindeki gri seviyesi için “he(i)” histogram eşitlemesi hesaplanmaktadır.

$$bdf(L) = \sum_{j=1}^L h(j) \quad (3.1)$$

$$he_L = \left(\frac{bdf_L - bdf_{min}}{M*N - bdf_{min}} \right) * (L - 1) \quad (3.2)$$

Gri seviyeleri bulunan termal görüntüde, geçişin daha net anlaşılmasını sağlayacak bir başka uygulamada piksel değerlerinin normalize edilmesidir. Bunun için kullanılan görüntü kesitine Eş.3.3’te belirtilen “Standart Ortalama Dağılım(Standard Normal Distribution)” yöntemi uygulanmıştır [45]. “D(x)” ilgili x değeri için standart dağılım fonksiyonunu, “μ” ortalama değeri, “σ” ise standart sapma değerini temsil etmektedir.

$$D(x) = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (3.3)$$

Görüntülenen hedef ne kadar pürüzsüz olursa olsun, görüntüleme sisteminde oluşan görüntüde siyahtan beyaza geçerken kademeli bir geçiş oluşacaktır. Şekil 3.1.’de gösterilen örnek görüntüden alınan kesit alanı için piksel değerlerinin gösterildiği Şekil 3.3. bu kademeli geçişi açıklamaktadır. Şekil 3.3.’te gösterilen piksel değerleri 14 bit çözünürlüğe sahip bir dedektörden alınmaktadır. Dolayısıyla gri seviye dağılımında 0 en açık (beyaz) pikseli ifade ederken 16384 en koyu (siyah) pikseli ifade etmektedir. Bu geçişi daha net bir şekilde görebilmek için görüntüdeki örnek sayılarını artırmak gerekmektedir. Bunun için kullanılan yöntemlerden biri olan enterpolasyon, görüntülerde bilinmeyen noktalardaki değerleri tahmin etmek için bilinen verileri kullanmaktadır [46-48]. Bu çalışmada, geçişi daha net görmek için Matlab uygulamasında “spline” komutu ile uygulanabilen, Eş.3.4’te belirtilen K(x)’in, Eş.3.4a, Eş.3.4b, Eş.3.4c ve Eş.3.4d kullanılarak kat sayıların bulunmasına ve çözülmesine dayanan kübik enterpolasyon yöntemi kullanılacaktır. Şekil 3.3.’te piksel değerleri gösterilen kesitin Enterpolasyon uygulanmış hali Şekil 3.4.’te gösterilmektedir.

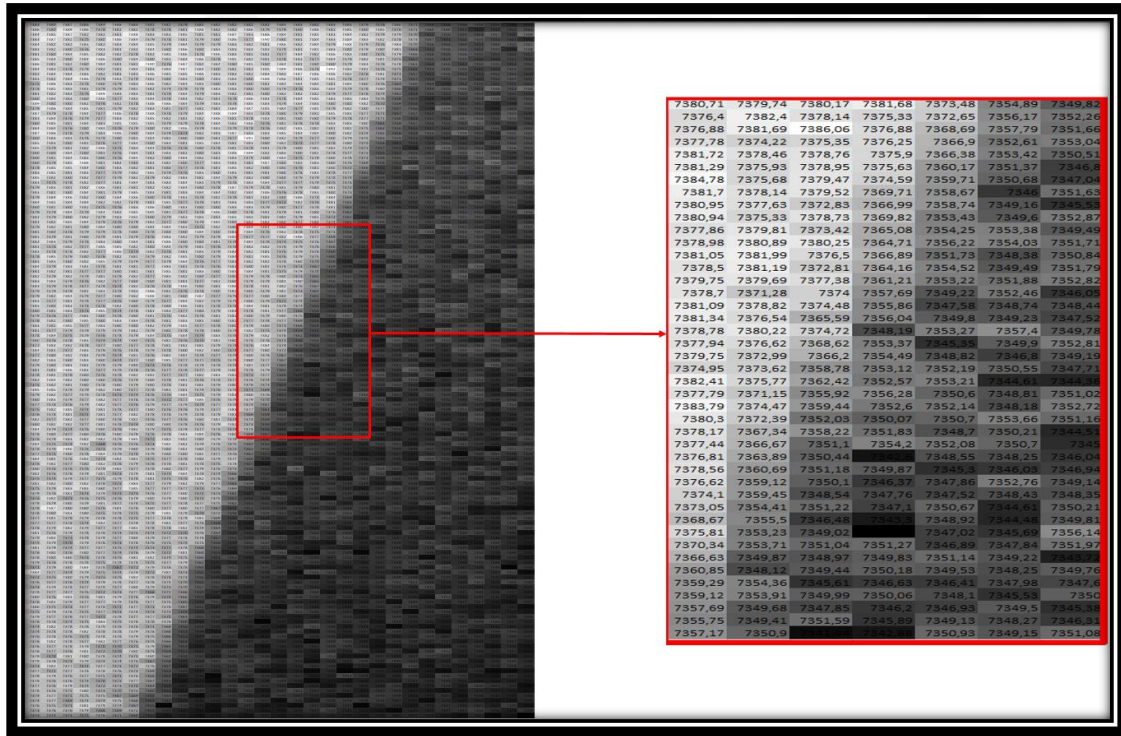
$$K_i(x) = a_i * x^3 + b_i * x^2 + c_i * x + d_i \quad (3.4)$$

$$K_i(x_i) = y_i \quad (3.4a)$$

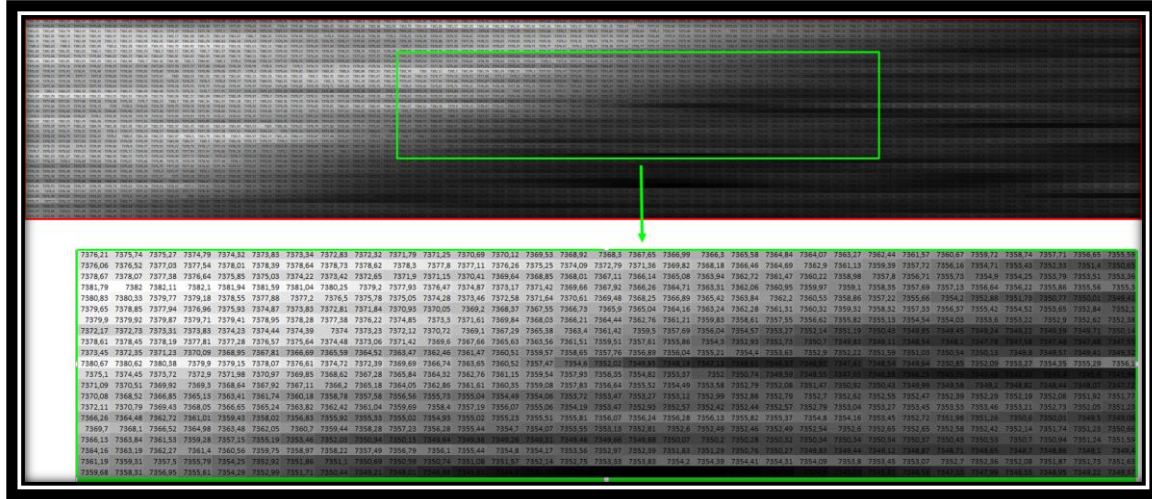
$$K_i(x_{i-1}) = y_{i-1} \quad (3.4b)$$

$$K'_i(x_i) = K'_{i+1}(x_i) \quad (3.4c)$$

$$K''_i(x_i) = K''_{i+1}(x_i) \quad (3.4d)$$



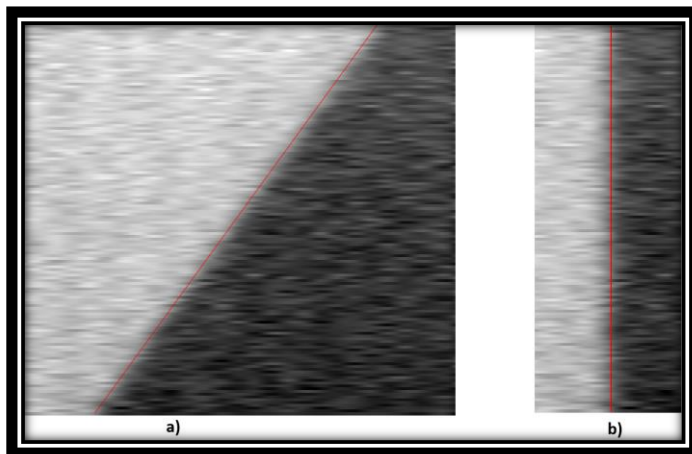
Şekil 3.3. Siyah-Beyaz Geçişinin Piksel Değerleri ile Gösterimi



Şekil 3.4. Enterpolasyon Uygulanmış Görüntüdeki Geçişin Piksel Değeri ile Gösterimi

Dedektör sayesinde elektronik olarak algılanan görüntüde, dedektör sensöründe var olabilecek hataların elimine edilmesi için eğik olarak kullanılan hedeften alınan görüntüdeki keskin kenarın bulunması gradyan yöntemi [49-51] kullanılarak yapılacaktır. Gadyan, görüntüdeki gri seviyesindeki geçişi tanımlamaktadır ve Eş.3.5’te belirtildiği gibi komşu pikseller arası farka göre hesaplanmaktadır. “G” j numaralı satır ve k numaralı sütun için geçiş değerini, “A” ise ilgili satır ve sütunun piksel değerini göstermektedir. Eğik olan keskin kenarın düzeltilmesi ise oluşturulan gradyan matrisine göre normalleştirme yönünde kaydırma yöntemi uygulanarak yapılmaktadır. Şekil 3.5.’te Enterpolasyon uygulanmış eğik görüntünün, gradyan yöntemi ile düzeltildikten sonraki hali gösterilmiştir.

$$G(j, k) = A(j, k + 1) - A(j, k) \quad (3.5)$$



Şekil 3.5. a) Enterpolasyon Uygulanmış Eğik Görüntü b) Gradyan Yöntemi ile Düzeltilmiş Görüntü

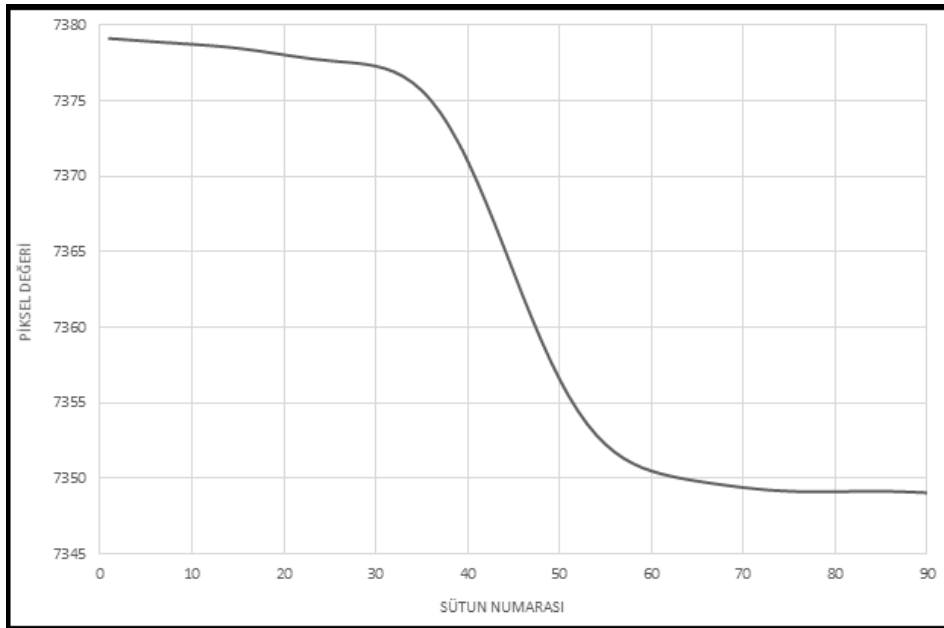
3.1.2. Kenar dağılım fonksiyonunun (ESF) hesaplanması

Görüntü alınıp düzeltmeler uyguladıktan sonra eğik kenar yöntemi ile MTF ölçümü için uygulanacak ilk adım kenar dağılım fonksiyonunun hesaplanması olacaktır.

İdeal bir kenarın girişine verilen sistem tepkisi, kenar dağılım fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Burada sistem çıktısı örneklenmiş bir görüntü olmaktadır. Bu örneklenmiş görüntünün sadece bir satırı ile işlem yapmak, modülasyon transfer fonksiyonunun hesabında kullanılacak olan kenar dağılım fonksiyonu için yeterli olmamaktadır [52]. Bu nedenle kullanılacak görüntüde, kenar boyunca yer alan tüm satırların hesaba katılması gerekmektedir.

N satır bulunan bir kenar görüntüsü için satırların ortalaması Eş.3.6 ile “Ortalama Satır” olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan ortalama satırın, Eş.3.3 ile ifade edildiği gibi normalize edilmektedir. Bu işlemlerden sonra örneklenen görüntüde bulunan M sütun boyunca oluşturulan kenar dağılım fonksiyonu Şekil 3.6.’ya benzer şekilde oluşturulmaktadır.

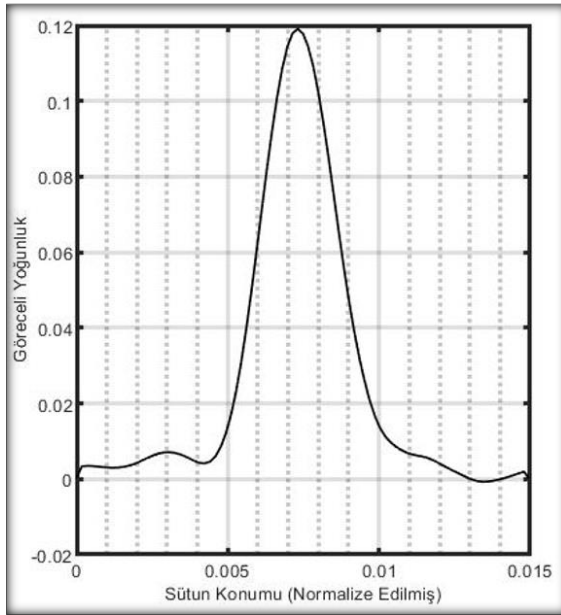
$$\text{Ortalama Satır} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{piksel}(i,M)}{N} \quad (3.6)$$



Şekil 3.6. Örnek Kenar Dağılım Fonksiyonu (ESF) Grafiği

3.1.3. Çizgi dağılım fonksiyonunun (LSF) hesaplanması

“Türev, bir fonksiyonun bir değişkeninde meydana gelecek sonsuz küçüklükteki bir değişimin fonksiyonun değerinde meydana getireceği artışın/azalışın, değişkendeki değişime oranıdır.” Bu bağlamda düşünüldüğünde ESF ile hesaplanan geçişin netliği türev yardımı ile hesaplanan ve Şekil 3.7.’de gösterilen örneklenen çizgi dağılım fonksiyonu ile anlaşılmaktadır.



Şekil 3.7. Örnek Çizgi Dağılım Fonksiyonu (LSF) Grafiği

ESF’in türevlenmesi sırasında gürültünün yükseltilmesinin önüne geçmek için eğri düzeltilmesi yöntemi kullanılmaktadır [46]. Bu bağlamda dağılım fonksiyonunun bir dereceli bir fonksiyona göre düzenlenmesi için Eş.3.7’nin temel alındığı, Matlab uygulamasındaki “polyfit” komutu kullanılmıştır.

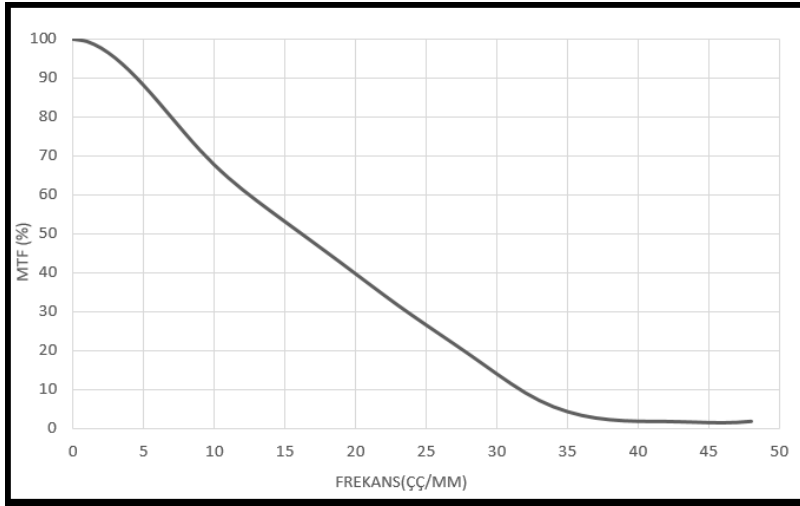
$$y = mx + n \quad (3.7)$$

3.1.4. MTF ölçümünün hesaplanması

Çizgi dağılım fonksiyonunun hesaplanması ile görüntüdeki siyah-beyaz geçişinin keskinliği zaman tabanında gösterilmektedir. Herhangi bir sinyalin, farklı genlikteki ve fazdaki sinüs dalga serileri ile ifade edilebileceğini göstermekte olan Fourier dönüşümü sayesinde uzamsal

frekans tabanında görüntü keskinliğinin ölçümünü sağlayan MTF hesaplanmaktadır. Eş.3.8’de belirtilen MTF hesabına ait örnek grafik Şekil 3.8.’deki gibidir.

$$MTF(x) = \frac{LSF(x)}{\delta x} \quad (3.8)$$



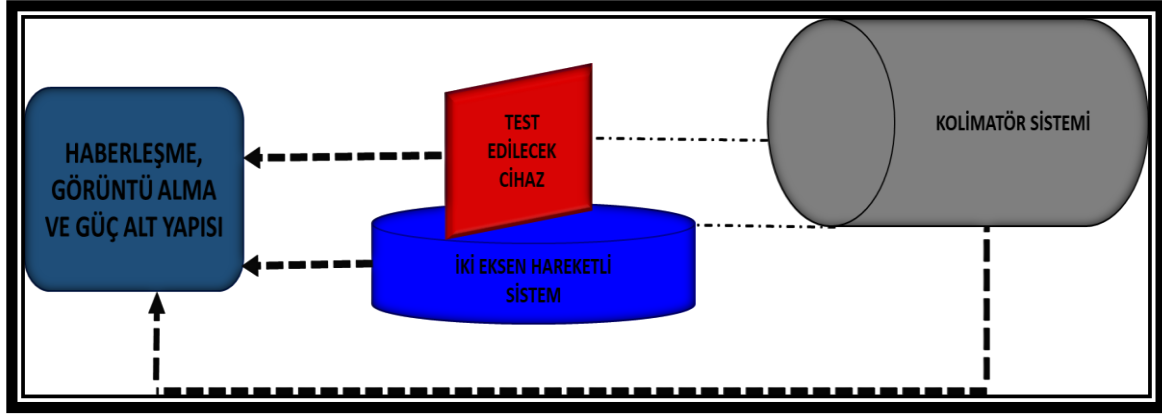
Şekil 3.8. Örnek Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF) Grafiği

3.2. Ölçüm Matematiğinin Doğrulama Çalışması

Bu bölümde anlatılacak olan çalışma; 3.1. maddesinde açıklanan adımlar doğrultusunda hesaplanacak olan eğik kenar yöntemi ile MTF ölçümü yönteminin doğrulanmasını amaçlamaktadır. Bu bağlamda doğrulamanın yapılabilmesi için karşılaştırma yapılacak bir başka ölçüm cihazına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla Aselsan/MGEO yerleşkesinde bulunan MTF ölçüm cihazı kullanılmıştır.

3.2.1. Deney düzeneğinin hazırlanması

MTF ölçüm sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için ölçüm öncesinde alınan görüntülerin aynı koşullarda alınmış olması gerekmektedir. Bu nedenle Şekil 3.9.’da gösterilen deney düzeneği hazırlanmıştır.



Şekil 3.9. Deney Düzeneği#1 - Ölçüm Matematiğinin Doğrulama Çalışması İçin Hazırlanan Düzenek

Hazırlanan deney düzeneğinde kullanılan görüntü sisteminde $15\ \mu\text{m}$ piksel aralığına sahip termal dedektör kullanılmıştır. Kullanılan objektif ise $5\ \mu\text{m}$ dalga boyunda çalışmaktadır ve $f/5,5$ özelliklidir. Eş.2.2 referans alındığında, kullanılan dedektörden dolayı MTF ölçümünün yapılabileceği maksimum uzamsal frekans $33,33\ \text{çç/mm}$ olmaktadır. Eş.2.3 referans alındığında ise objektiften dolayı MTF ölçümünün yapılabileceği maksimum uzamsal frekans $36,36\ \text{çç/mm}$ olmaktadır. Bu iki denkleme göre sistem için kullanılacak maksimum frekansı belirlediğimiz Eş.2.4 yardımıyla sistemde kullanılacak maksimum uzamsal frekansın $33,33\ \text{çç/mm}$ olduğu anlaşılmaktadır.

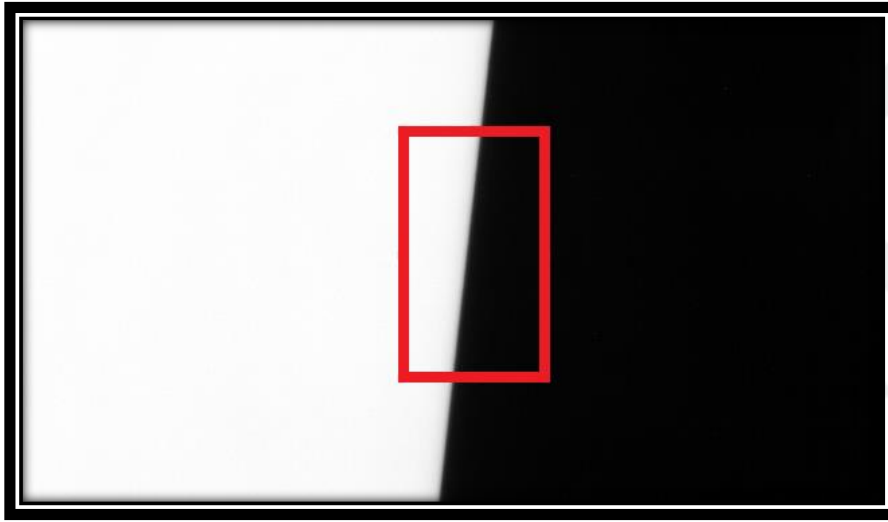
Şekil 3.9.'da belirtilen kolimatör sistemi “İki Eksen Hareketli Sistem” ile görüntüleme sisteminin kolimatör açıklığına göre hizalanması sağlanmaktadır. Bu şekilde yarım ay hedefin görüntüleme sisteminin merkezine gelecek şekilde görüntü alınması sağlanmıştır. Kullanılan yarım ay hedefin yönü, kolimatör sisteminde bulunan hedef tekeri ile ayarlanabilmektedir. Bu sayede, yarım ay hedef hem yatay konumdayken hem de dikey konumdayken görüntü kaydedilmesi sağlanmıştır.

3.2.2. Sonuçların alınması

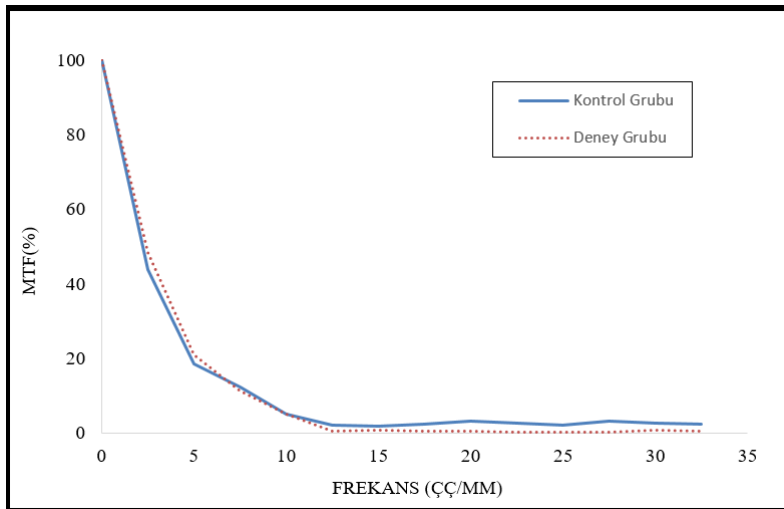
Yarım ay hedef dikey konumda ayarlandıktan ve hedef, termal görüntüleme sisteminin merkezinde olacak şekilde ayarlandıktan sonra Şekil 3.10'da gösterilen görüntü kaydedilmiştir. Daha sonra keskin kenar merkezde olacak ve görüntünün koyu ve açık bölgeleri eş alana sahip olacak şekilde kesit alını seçilmiştir.

Kesit alanı belirlenen görüntüler ilk olarak, Aselsan/MGEO tesisinde var olan ve deney düzeneği için kullanılan sistemin içerisinde bulunan MTF arayüzü ile işlenmiştir. Burada çıkan sonuçlar “Deney Düzeneği #1 – Dikey Hedef Kontrol Grubu” olarak kaydedilmiştir ve Şekil 3.11’de gösterilen MTF ölçüm grafiğinde “Kontrol Grubu” ismiyle görülmektedir.

Kaydedilen görüntü daha sonra 3.1. maddesinde açıklanan algoritma ile hazırlanan yazılım ile işlenmiştir. Bu yazılımın sonucunda elde edilen veriler ise “Deney Düzeneği #1 – Dikey Hedef Deney Grubu” olarak kaydedilmiştir ve Şekil 3.11’de gösterilen MTF ölçüm grafiğinde “Deney Grubu” ismiyle görülmektedir.

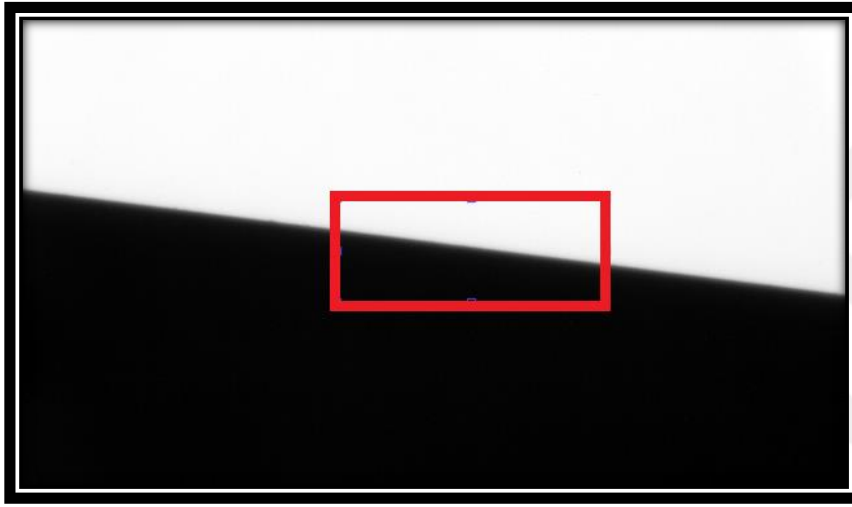


Şekil 3.10. Deney Düzeneği#1 – Dikey Hedef İle Kaydedilen Görüntü ve Hesaplama İçin Kullanılacak Kesit Alanı

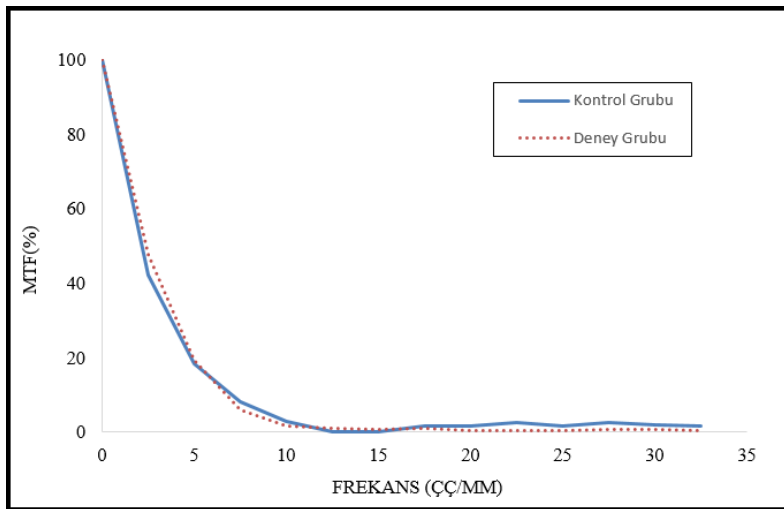


Şekil 3.11. Deney Düzeneği#1’den Alınan Dikey Hedef Görüntüsünün MTF Sonuçları

Yarım ay hedef yatay konumda ayarlandıktan sonra aynı işlemler tekrarlanarak sonuçlar alınmıştır. Şekil 3.12’de gösterilen görüntü kaydedilmiştir ve keskin kenar merkezde olacak ve görüntünün koyu ve açık bölgeleri eş alana sahip olacak şekilde kesit alanı seçilmiştir. Sonuçlar dikey hedefte olduğu gibi hesaplanmıştır. “Deney Düzeneği #1 – Yatay Hedef Kontrol Grubu” olarak kaydedilen sonuçlar Şekil 3.13’te gösterilen MTF ölçüm grafiğinde “Kontrol Grubu” ismiyle görülmektedir. “Deney Düzeneği #1 – Yatay Hedef Deney Grubu” olarak kaydedilen sonuçlar Şekil 3.13’te gösterilen MTF ölçüm grafiğinde “Deney Grubu” ismiyle görülmektedir.



Şekil 3.12. Deney Düzeneği#1 – Yatay Hedef İle Kaydedilen Görüntü ve Hesaplama İçin Kullanılacak Kesit Alanı



Şekil 3.13. Deney Düzeneği#1’den Alınan Yatay Hedef Görüntüsünün MTF Sonuçları

Yatay ve dikey hedef için kontrol grupları ve deney gruplarından elde edilen sonuçları için Eş.3.9’da belirtilen kök ortalama kare sapma (Root Mean Square Deviation – RMSD) hesabı yapılmıştır. Bu hesaba göre dikey hedef için kontrol grubu ve deney grubu arasında %2,18 sapma bulunmaktadır. Yatay hedef için ise kontrol grubu ve deney grubu arasında %1,96 sapma bulunmaktadır.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{N}} \quad (3.9)$$

3.3. Termal Lenste Eğik Kenar Yöntemi Kullanılarak MTF Ölçümü Ve Ölçüm Sonucunu Etkileyen Parametreler

Bu çalışma ile eğik kenar yöntemi kullanılarak termal lensin MTF ölçümü yapılırken; hedef eğiminin açısı, kaydedilen görüntünün sahne sayısı, hesaplama için alınan görüntünün kesit alanı, dedektör ve lens arası mesafe faktörlerinin MTF sonucunu etkilediği gösterilmiştir. Bu faktörler bazında kontrol grupları oluşturulmuş, ölçümler alınmış ve sonuçlar hesaplanarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

3.3.1. Deney düzeneğinin hazırlanması

Kontrol parametrelerinin değiştirilerek sonuçların alınabilmesi için parametrelerin değişimine izin veren deney düzeneği Şekil 3.14.’teki gibi hazırlanmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan materyaller ve kullanım amaçları aşağıda açıklanmıştır.

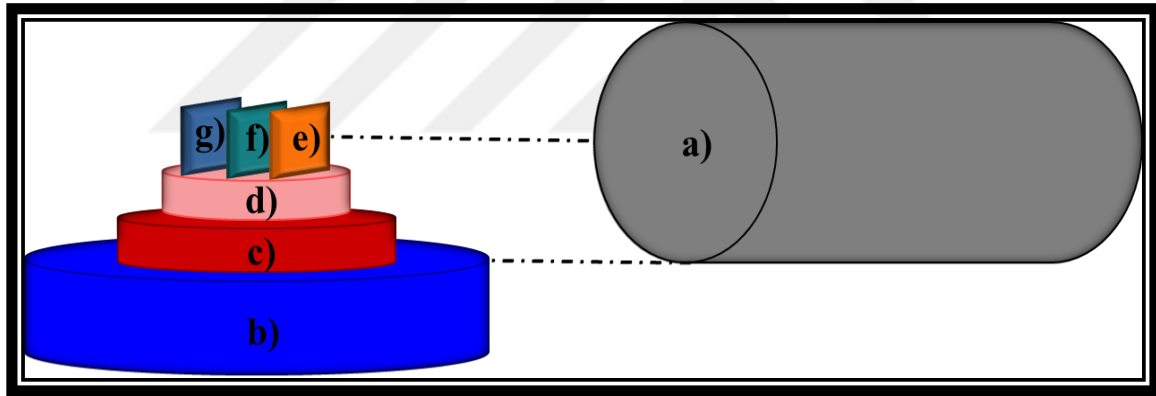
Kolimatör Sistemi: Deney düzeneğinde, termal görüntüler için kara cisim kaynağı bulunan, yarım ay hedefin takılabileceği hedef tekerine sahip, 1,5 metre uzunluğunda ve f/5 sayısı değerine sahip bir kolimatör kullanılmıştır.

Mekanik Parçalar: Platform hareketini sağlamak için iki eksenle kontrol edilebilen hareketli mekanizma kullanılmıştır. Lens ve dedektör arasındaki yatay mesafe ise yine iki eksenle kontrol edilebilen daha küçük boyutlu hareketli mekanizma ile ayarlanabilmektedir. Lens ve dedektörün birbirine göre paralel duruşu ise gonyometre ile ayarlanarak sağlanmıştır.

Lens: MTF ölçümünün değerlendirilmesi için kullanılacak test edilecek üründür. Deney düzeneğinde, kalibrasyon lense olarak üretilen, 8,5 μm boyunda çalışan $f/1,67$ değeri olan bir lens kullanılmıştır. Kalibrasyon lense olduğu için teorik hesaplamaları mevcuttur.

Dedektör: Görüntüleme sisteminde lensin arkasında bulunan dedektör, lensten gelen görüntünün elektronik olarak algılanmasını sağlamaktadır. Deney düzeneğinde bolometrik özellikli 17 μm piksel aralığına sahip bir termal dedektör kullanılmıştır. Kullanılan dedektörün teorik olarak hesaplanmış MTF bilgisi mevcuttur.

Elektronik Kart Takımı: Dedektörün elektronik sinyale dönüştürdüğü görüntünün bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlayan elektronik kart takımı kullanılmıştır. Bilgisayara aktarılan görüntünün, aktarım formatına göre algılanmasını ve izlenmesini sağlayan ara yüz yazılımı tasarlanmıştır. Bu ara yüz yazılımı ile MTF hesabı için kullanılacak görüntünün kaydı alınabilmektedir.



Şekil 3.14. Deney Düzeneği#2 – Ölçüm Parametrelerinin Etkisini Ölçmek İçin Hazırlanan Düzenek a) Kolimatör Sistemi b) Platform Hareketini Sağlayan Mekanik c) Dedektör – Lens Arası Mesafenin Ayarlandığı Mekanik d) Gonyometre e) Lens f) Dedektör g) Elektronik Kart Takımı

Şekil 3.14.'te anlatılan deney düzeneğine ek olarak hizalamaların yapılması için otokolimatör kullanılmıştır. Otokolimatör, hassas açısal ölçüm yapabilen optik cihazlara verilen isimdir. Bu çalışmada kullanılan otokolimatör, sağladığı uygulama yazılımı ile kendi içerisinde bulunan kameradan hizalanmak istenen görüntünün bilgisayar ortamına aktarılmasını ve mikrometre mertebesinde ayar yapılmasını sağlayan mekanizması bulunan bir otokolimatördür.

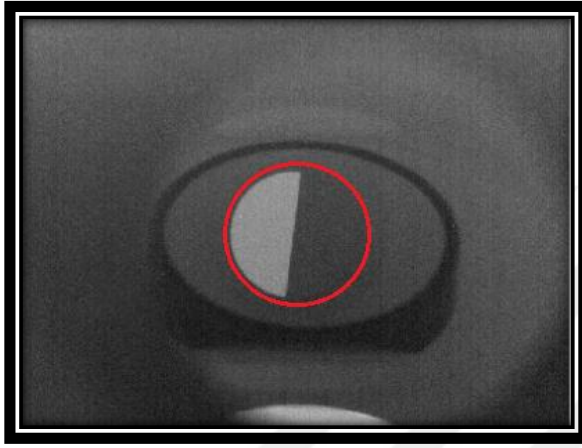
Görüntüleme sistemleri lens takımı ve dedektörden oluşan iki temel bileşenin uyum içerisinde çalışacağı durum için tasarlanmaktadır. Bu bağlamda, hazırlanan deney düzeneğinde de ayarlanabilir mekanikler sayesinde dedektör ve lensin konumları odaklı, net bir görüntü alınabilecek şekilde hazırlanmıştır. Hedef görüntünün alınacağı kolimatör sistemi ve lens otokolimatör yardımı ile aşağıdaki adımlarda anlatıldığı gibi hizalanmıştır.

1. Kolimatörden görüntülenmesi için 4 çizgi hedef ayarlanmıştır.
2. Kendi içerisinde kamerası bulunan otokolimatör, kolimatörün karşısına yerleştirilmiştir.
3. Otokolimatörün bilgisayar ara yüzünden kolimatördeki hedef görüntülenerek, otokolimatörün hizalaması yapılmıştır.
4. Otokolimatör ile kolimatör arasına lens yerleştirilmiştir.
5. Otokolimatörün içerisindeki hedefin lensten yansıyarak otokolimatör ara yüzünde izlenebildiği ortamda, lensin yerleştirildiği mekanikler hareket ettirilerek hizalama yapılmıştır ve böylece kolimatör sistemi ile lens hizalı hale gelmiştir.

Hizalama çalışmasının ardından lensin arkasına deney düzeneğinde kullanılacak dedektör ve dedektöre bağlı kart alt yapısı yerleştirilmiştir. Dedektör konumu görüntü odağı referans alınarak aşağıdaki adımlar doğrultusunda ayarlanmıştır.

1. Dedektör ve lensin odaklı konumda ayarlanabilmesi için, kolimatörden gelen görüntünün dedektöre bağlı kartlardan çıkarak bilgisayardan izlenebilmesi için kartlar ve bilgisayar arasındaki kablo bağlantısı sağlanmıştır.
2. Kolimatörden görüntülenmesi için 4 çizgi hedef ayarlanmıştır.
3. Dedektör ve lensin aynı eksende hizalanması için gonyometre kullanılmıştır. Bilgisayara aktarılan görüntü referans alınarak gonyometre ile ayar yapılmıştır.
4. Gonyometre konumu, tüm sistemin üzerinde bulunduğu hareketli mekanik ile kolimatörden gelen görüntünün, görüntüleme sisteminin her bir köşesinde ve merkezde odaklı olduğu zaman sabitlenmiştir.
5. Bilgisayara aktarılan görüntü referans alınarak, lens altında bulunan mekanik ile dedektör ve lens arasındaki mesafe ayarlanmıştır.
6. Odak ayarı da yapıldıktan sonra deney düzeneği ölçümleri almak için hazır hale gelmiştir.

Bu çalışmada kullanılan kolimatör etkin uzaklık değeri ile lens etkin uzaklık değeri arasında 1(lens) : 5(kolimatör) oranının mevcudiyetinden dolayı, Şekil 3.15.'te görüldüğü gibi lense gelen görüntü hedefin yanı sıra kolimatör içerisindeki boşluğu da içermektedir. 640x480 piksel dizini ile görüntü aktarımını sağlayan dedektörden kaydedilen görüntü ile işlem yapılırken görüntünün hedef içeren kısmı işleme alınacaktır ve ölçümler için kullanılacak kesit alanı piksel olacaktır.

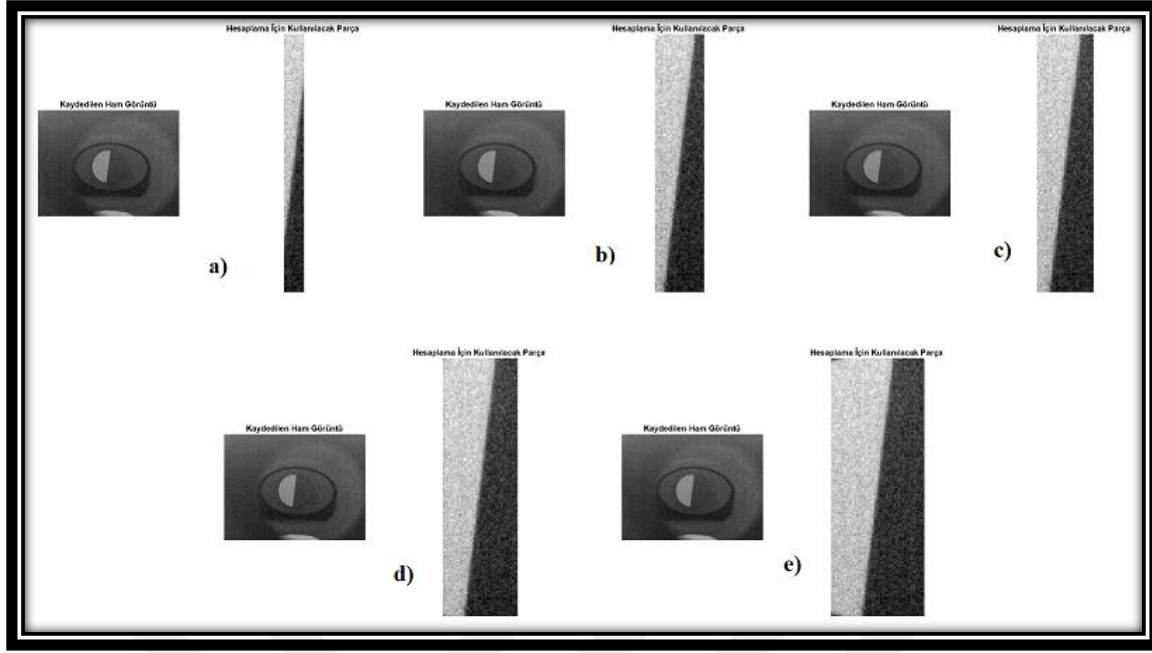


Şekil 3.15. Dedektörden Alınan Ham Görüntü - Kırmızı Çerçevesi Bölge Hedefin Görüntüsü

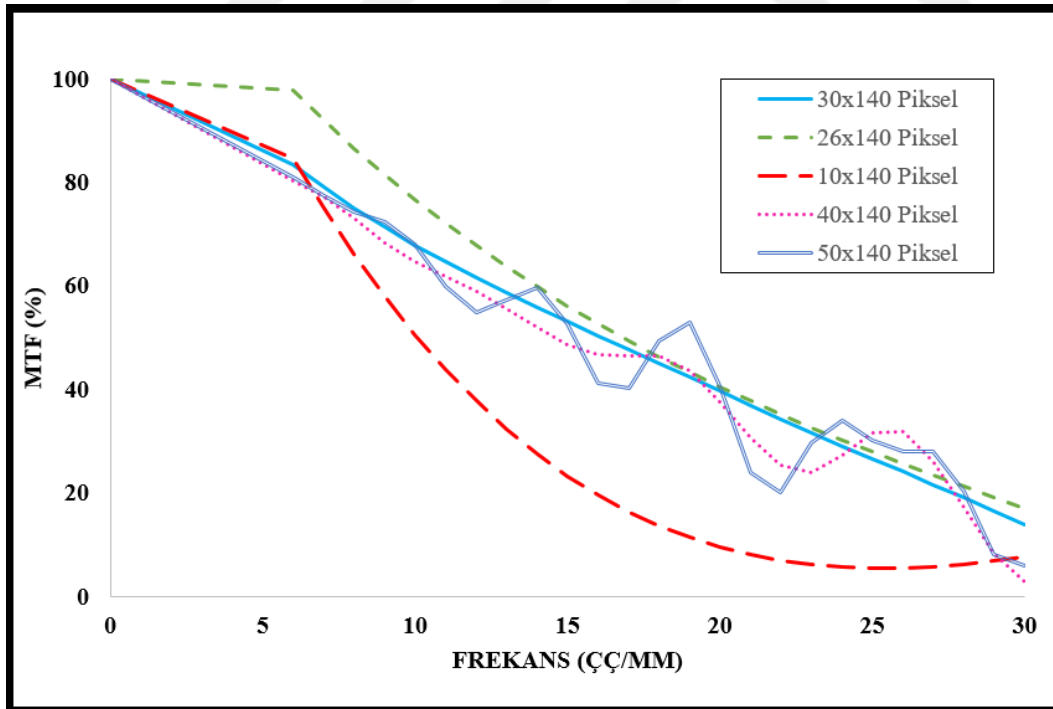
MTF hesaplamaları sırasında grafiklerde anlamlı değerler görebilmemiz için kullanılacak maksimum uzamsal frekansın belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, deney düzeneğinde kullanılan dedektör ve lens bilgilerinin Eş.2.2, Eş.2.3 ve Eş.2.4'te belirtilen formüllere uygulanması ile maksimum uzamsal frekansın 29,41 çç/mm olduğu bulunmaktadır.

3.3.2. Kesit alanı parametresinin etkisinin görülmesi için ölçümlerin yapılması

Hesaplama için alınan görüntünün kesit alanının etkisinin anlaşılabilmesi için, yarım ay hedef dikey konumda $7,12^\circ$ olarak ayarlanarak 100 çerçeve örnekleme olacak şekilde görüntü kaydedilmiştir. Eğik kenar boyunca geçişin olduğu kesit alanının genişliğinin etkisini görebilmek için kaydedilen görüntüden farklı büyüklükte kesit alanları alınmıştır. Bu kesit alanları seçilirken açık ve koyu bölgelerin eş büyüklükte olmasına önem verilmiştir. Kaydedilen görüntüler ve kullanılan kesit alanları Şekil 3.16.'da görüldüğü gibi 10x140, 26x140, 30x140, 40x140, 50x140 piksel boyutu şeklindedir. Bu kesit alanları kullanılarak yapılan MTF hesabının sonuç grafikleri Şekil 3.17.'de gösterildiği gibidir.



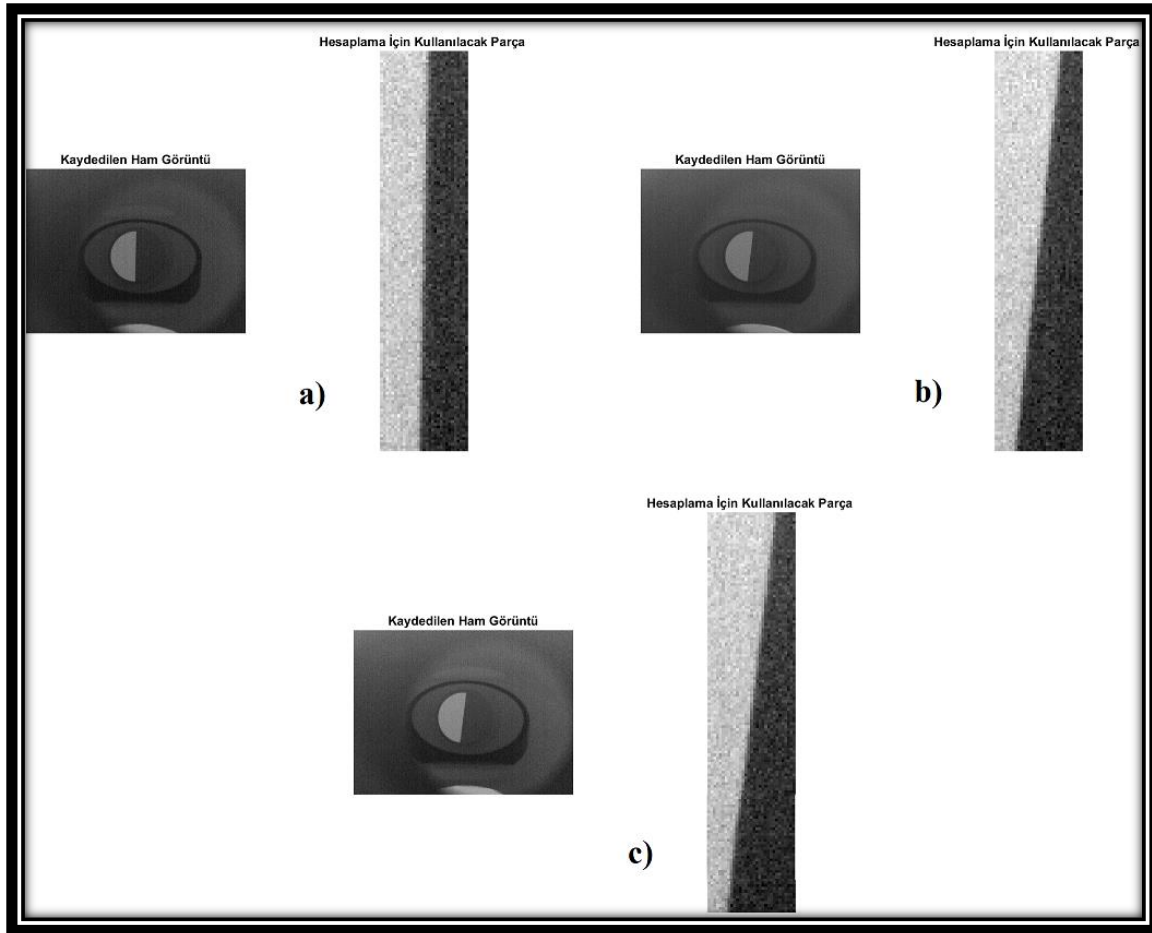
Şekil 3.16. Kullanılan Kesit Alanına Göre Kaydedilen Görüntüler ve Hesaplama İçin Kullanılan Parçalar a) Kesit Alanı: 10x140 b) Kesit Alanı: 26x140 c) Kesit Alanı: 30x140 d) Kesit Alanı: 40x140 e) Kesit Alanı: 50x140



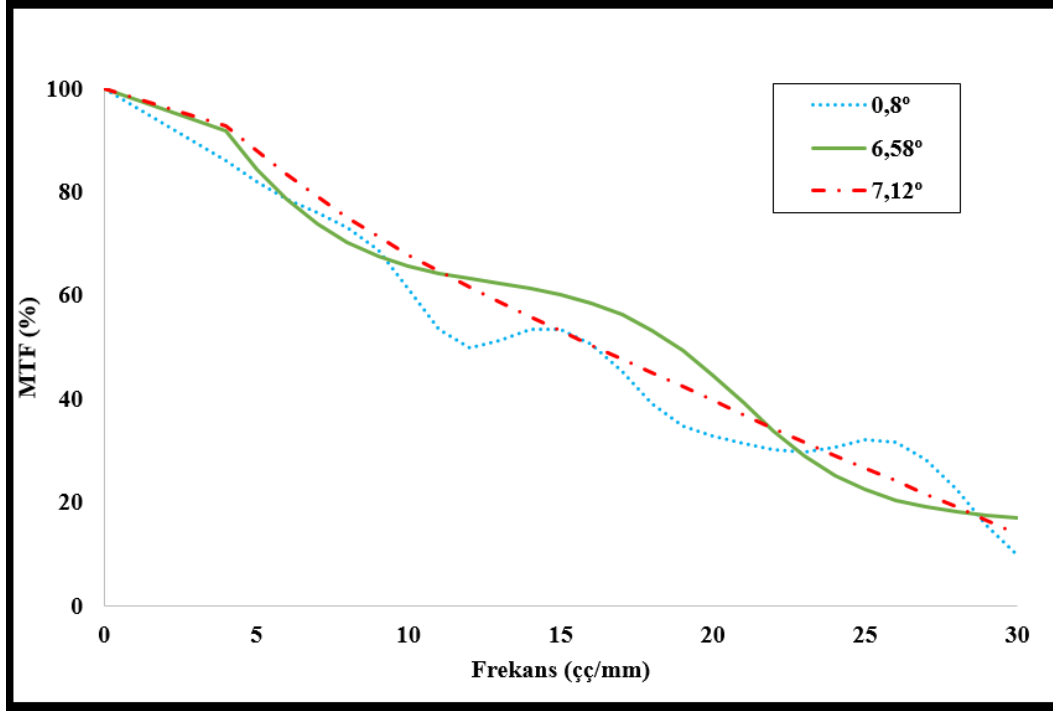
Şekil 3.17. Kullanılan Kesit Alanına Göre MTF Sonuçlarının Karşılaştırma Grafiği

3.3.3. Hedef eğimi parametresinin etkisinin görülmesi için ölçümlerin yapılması

Hedef eğiminin açısının MTF sonucuna etkisinin gösterilebilmesi için, dikey konumda ayarlanan yarım ay hedef Şekil 3.18.'de gösterildiği gibi sırasıyla $0,8^\circ$, $6,58^\circ$, $7,12^\circ$ açılarda ayarlanarak görüntü kayıtları alınmıştır. Her bir görüntü kaydı için 100 çerçeve örnekleme alınmıştır ve kullanılacak kesit alanı Şekil 3.17. referans alındığında 30×140 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.19.'da bulunan grafik, bu üç açı değeri için hesaplanan MTF değerinin karşılaştırılmasını göstermektedir.



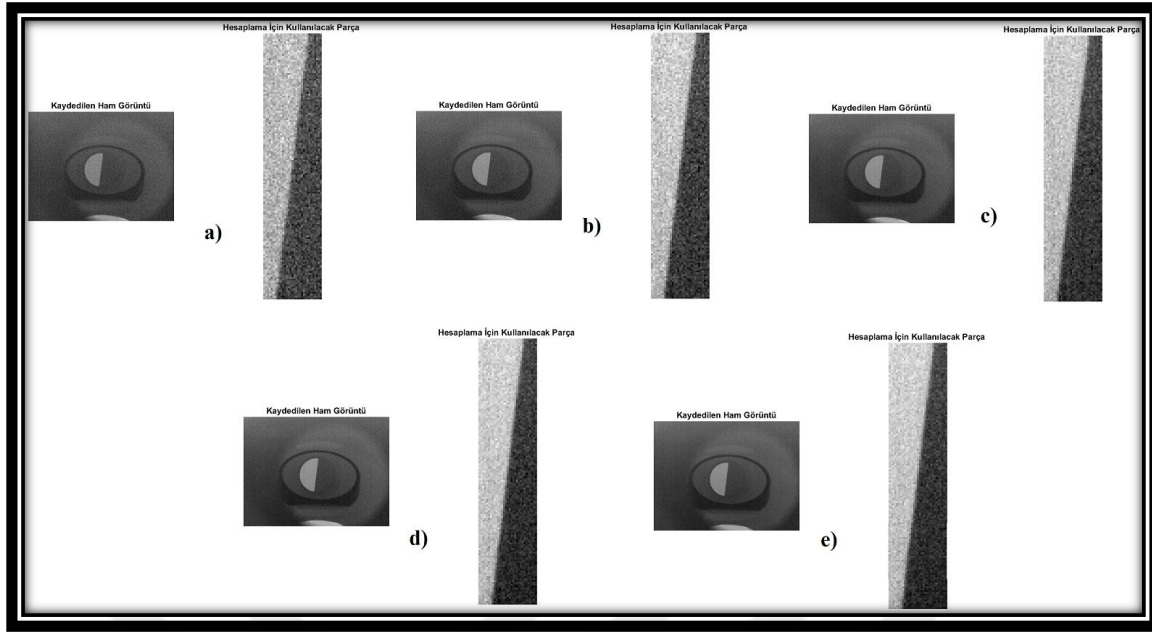
Şekil 3.18. Hedef Eğimine Göre Kaydedilen Görüntüler ve Hesaplama İçin Kullanılan Parçalar a) Hedef Eğimi: 0.8° b) Hedef Eğimi: 6.58° c) Hedef Eğimi: 7.12°



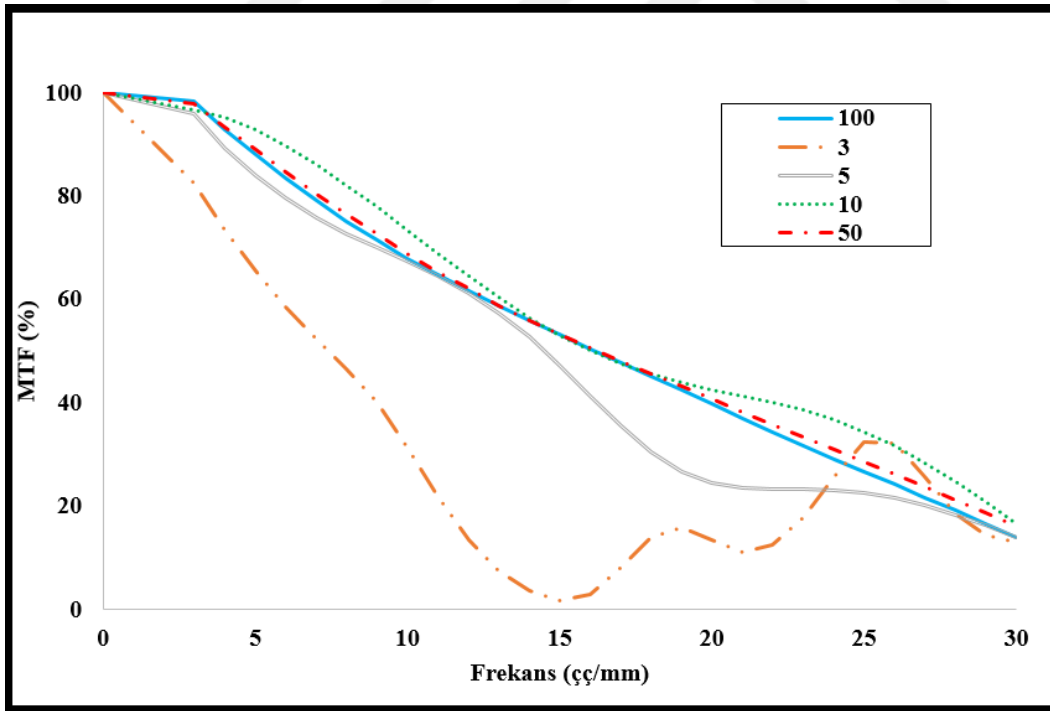
Şekil 3.19. Hedef Eğimine Göre MTF Sonuçlarının Karşılaştırma Grafiği

3.3.4. Kaydedilen çerçeve sayısı parametresinin etkisinin görülmesi için ölçümlerin yapılması

Hesaplama yapmak için kaydedilen çerçeve sayısının etkisini görmek için, hedef görüntüsü Şekil 3.20.'de gösterildiği gibi sırasıyla 3, 5, 10, 50, 100 çerçeve sayılarında kaydedilmiştir. Şekil 3.17. ve Şekil 3.19. referans alındığında, hedef 7,12°'lik açı ile hazırlanmıştır ve MTF hesaplaması için 30x140 piksel boyutlu kesit alanı kullanılmıştır. Çerçeve sayılarına göre yapılan hesaplamalar sonucunda oluşan karşılaştırma grafiği Şekil 3.21.'deki gibi olmuştur.



Şekil 3.20. Sahne Sayısına Göre Kaydedilen Görüntüler ve Hesaplama İçin Kullanılan Parçalar a) Çerçeve Sayısı: 3 b) Çerçeve Sayısı: 5 c) Çerçeve Sayısı: 10 d) Çerçeve Sayısı: 50 e) Çerçeve Sayısı: 100

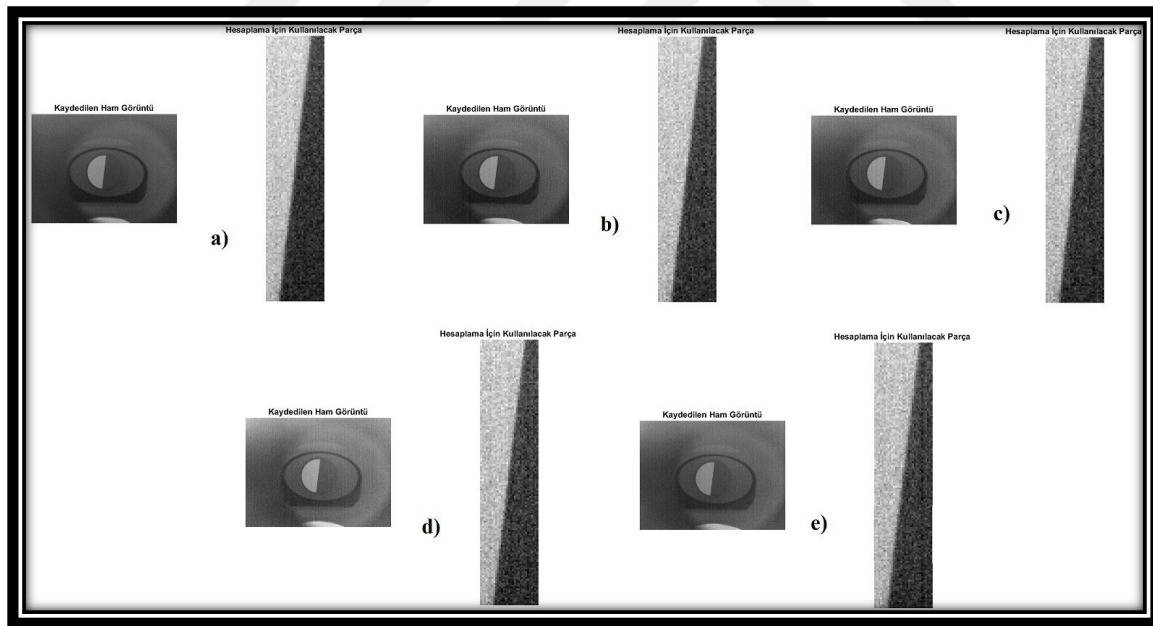


Şekil 3.21. Çerçeve Sayısına Göre MTF Sonuçlarının Karşılaştırma Grafiği

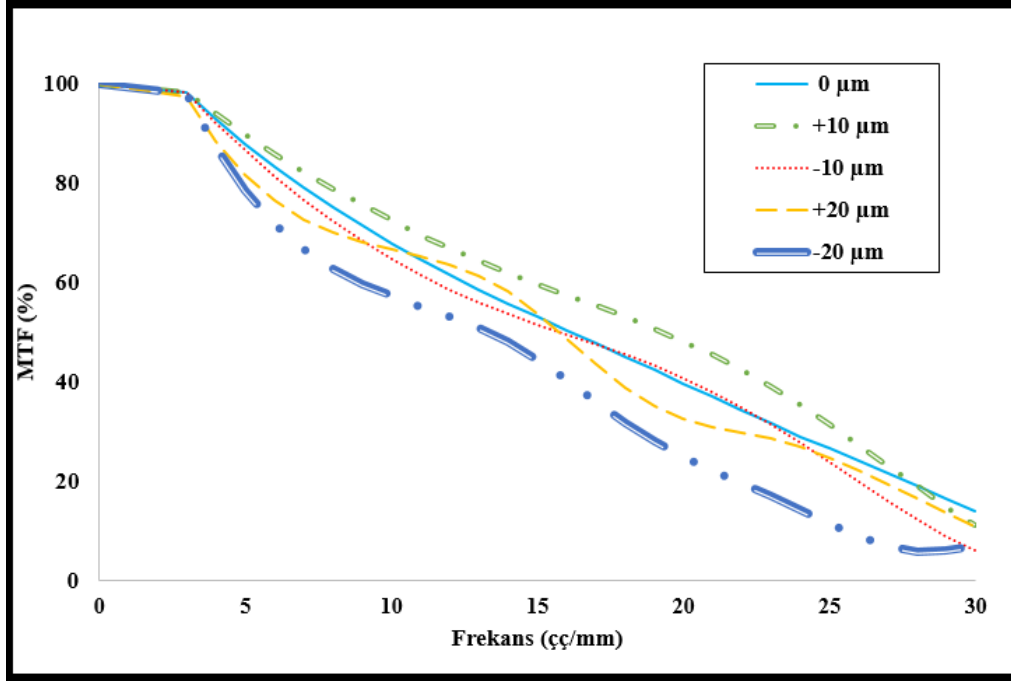
3.3.5. Dedektör ve lens arası mesafe parametresinin etkisinin görülmesi için ölçümlerin yapılması

Deney düzeneğinin hazırlanması sırasında lens ve dedektör arasındaki mesafe, odağın en iyi olduğu (dedektörden aktarılan görüntüdeki hedef netliği referans alınarak) konumda ayarlanmıştır. Bu mesafeye bağlı olarak odağın bozulmasının MTF üzerindeki etkisini görmek için; lens dedektör arasındaki mesafe ilk konuma göre $\pm 10 \mu\text{m}$ ve $\pm 20 \mu\text{m}$ hareket ettirilerek, 7.12° 'lik hedefin görüntüleri 100 örnekleme ile Şekil 3.22.'deki gibi kaydedilmiştir. Kaydedilen görüntülerin 30×140 piksel boyutlu kesit alanı kullanılarak MTF hesabı yapılmıştır. Hesaplama sonucunda çıkan karşılaştırmalı grafik Şekil 3.23.'teki gibidir.

Odaklı mesafeden uzaklığa göre alınan MTF sonuçları için Eş.3.9'da belirtilen kök ortalama kare sapma hesabı yapılmıştır. Bu hesaba göre odaklı noktadaki bozulmaya bağlı oluşan sapma Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Lens-Dedektör Arası Odaklı Mesafeye Göre Kaydedilen Görüntüler ve Hesaplama İçin Kullanılan Parçalar a) Mesafe: $0 \mu\text{m}$ b) Mesafe: $+10 \mu\text{m}$ c) Mesafe: $-10 \mu\text{m}$ d) Mesafe: $+20 \mu\text{m}$ e) Mesafe: $-20 \mu\text{m}$



Şekil 3.23. Lens-Dedektör Arası Odaklı Mesafeye Göre MTF Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çizelge 3.1. Odaklı Mesafeden Uzaklığa Göre Sapma Çizelgesi

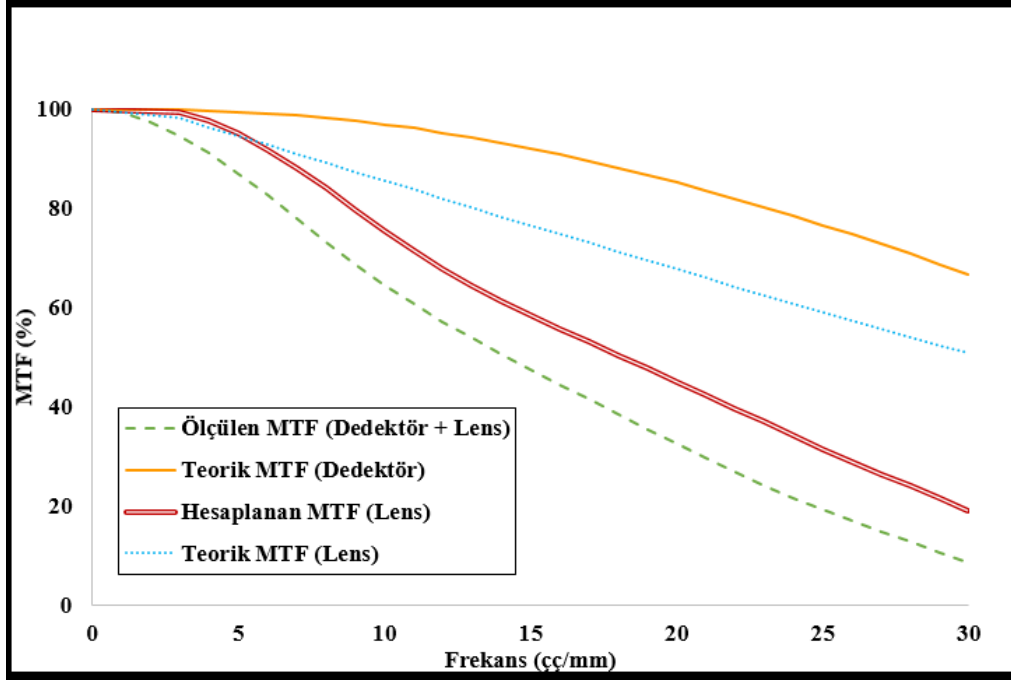
Odaklı Mesafeden Uzaklık (μm)	MTF Sonucunda Değişim (%)
+10	5,49
-10	3,25
20	4,09
-20	11,74

3.3.6. Ölçüm sırasında kullanılan dedektörün etkisi

Deney düzeneğinde kullanılan lens için teorik değerler mevcuttur. Şekil 3.17., 3.19., 3.21 ve 3.23'te bulunan grafikler referans alındığında teorik değer ile kıyaslamak için; 7.12°'lik açı ile ayarlanmış hedeften, dedektör-lens arası mesafe 3.3.2 maddesinde anlatıldığı gibi odaklı görüntüye göre ayarlı olacak şekilde 100 çerçeve örneklemeli görüntü alınmış ve 30x140 kesit alanında MTF hesaplanmıştır. Hesaplanan sonucun lensin teorik değeri ile kıyaslanması Şekil 3.24.'teki gibidir.

Lense ait ölçülen ve teorik MTF sonuçları için Eş.3.9'da belirtilen kök ortalama kare sapma hesabı yapılmıştır. Bu hesaba göre iki MTF sonucu arasında %43,07 kadar fark olduğu görülmektedir. Bu farkın temel kaynağı dedektör MTF değeridir. Frekans tabanında sistem MTF'si dedektör MTF'sine bölünerek lens MTF'si hesaplanmaktadır. İdeal kabul edilerek

hesaplanan dedektör MTF'si eklenebilecek gürültü ve hatalar yok sayıldığı için lens MTF'sinin de hatalı hesaplanmasına sebep olmaktadır.



Şekil 3.24. Teorik MTF Verisi ile Ölçülen MTF Verisinin Karşılaştırma Grafiği

3.4. Dedektör İçin Görüntü Normalizasyonu İşleminin MTF Ölçüm Sonuçlarına Etkisi

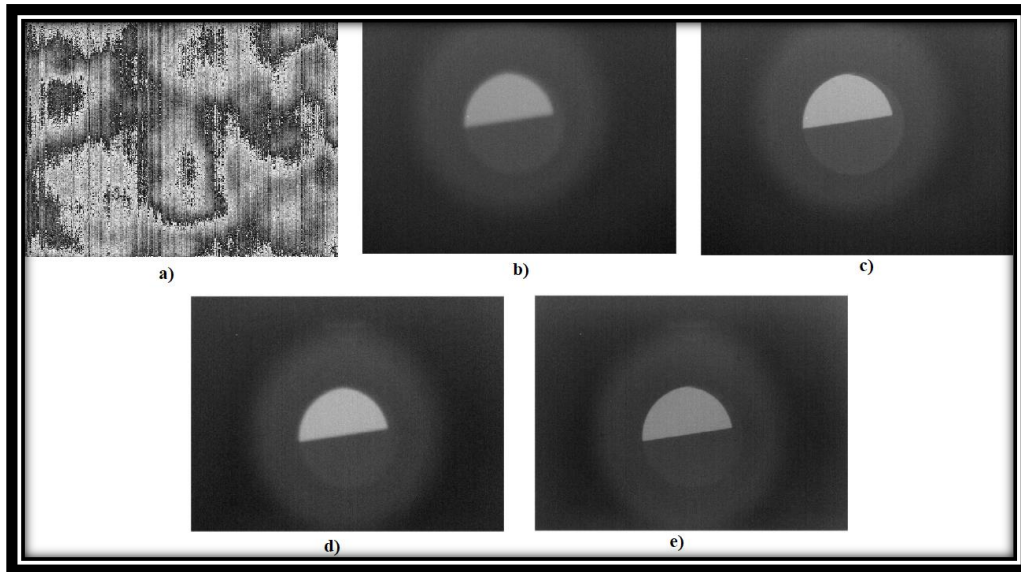
Bu çalışmada Bölüm 2.1.3.'te anlatılan görüntü normalizasyon işlemlerinin MTF sonuçlarına etkisi gösterilmiştir. Bu gösterimin sağlanabilmesi için $f/10$ değerine sahip 3 metre uzunluğundaki eksen dışı kolimatör sisteminden $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ kara cisim farksal sıcaklık değerinde, $17\text{ }\mu\text{m}$ piksel aralıklı, $12\text{ }\mu\text{m}$ dalga boyunda çalışan ve $f/1.4$ değerine sahip test cihazı ile görüntüler alınmıştır. 8° olarak yatay konumda ayarlanan hedeften, her bir durum için aynı kesit alanı kullanılarak MTF hesaplamaları yapılmıştır. MTF hesaplamaları sonucunda elde edilen grafiklerde belirtilecek maksimum frekans değeri Eş.2.2, Eş.2.3 ve Eş.2.4 yardımıyla hesaplanmıştır ve $29,41\text{ ç/mm}$ olarak belirlenmiştir.

İlk alınan görüntüler, test cihazına dolayısıyla test cihazı üzerindeki dedektöre hiçbir görüntü normalizasyonu uygulanmadan alınan görüntülerdir. Bu görüntüde Şekil 3.25.a'da gösterildiği gibi anlamlandırılabilen veriler içermemektedir. Dedektörün algıladığı termal görüntüyü anlamlandırabilmesi için 1 nokta normalizasyon uygulanmıştır ve böylece Şekil

3.24b’de gösterilen hedef görüntüsü elde edilmiştir. Sadece 1 nokta normalizasyonun uygulandığı dedektörden alınan bu görüntüye göre elde edilen MTF sonucu Şekil 3.26.’da “1 Nokta (+) & Odak (-) & 2 Nokta (-)” etiketli egride gösterilmektedir. Akabinde test edilen objektifin odaklı görüntü sağlaması için ayarları yapılmıştır ve Şekil 3.26c’de gösterilen hedef görüntüsü elde edilmiştir. Odak ayarı sonrası elde edilen bu görüntü ile elde edilen MTF sonucu Şekil 3.25.’te “1 Nokta (+) & Odak (+) & 2 Nokta (-)” etiketli egride gösterilmektedir.

Daha sonra test edilen objektife 2 nokta normalizasyon işlemi uygulanmıştır ve Şekil 3.25.d’de gösterilen ve Şekil 3.26.’da “1 Nokta (+) & Odak (-) & 2 Nokta (+)” etiketli egride MTF sonucu belirtilen hedef görüntüsü elde edilmiştir. Uygulanan normalizasyonlardan sonra yapılan odak ayarının ardından alınan 3.26.e’de gösterilen hedef görüntüsüne ait MTF sonucu Şekil 3.26.’da “1 Nokta (+) & Odak (+) & 2 Nokta (+)” etiketli egride belirtilmektedir.

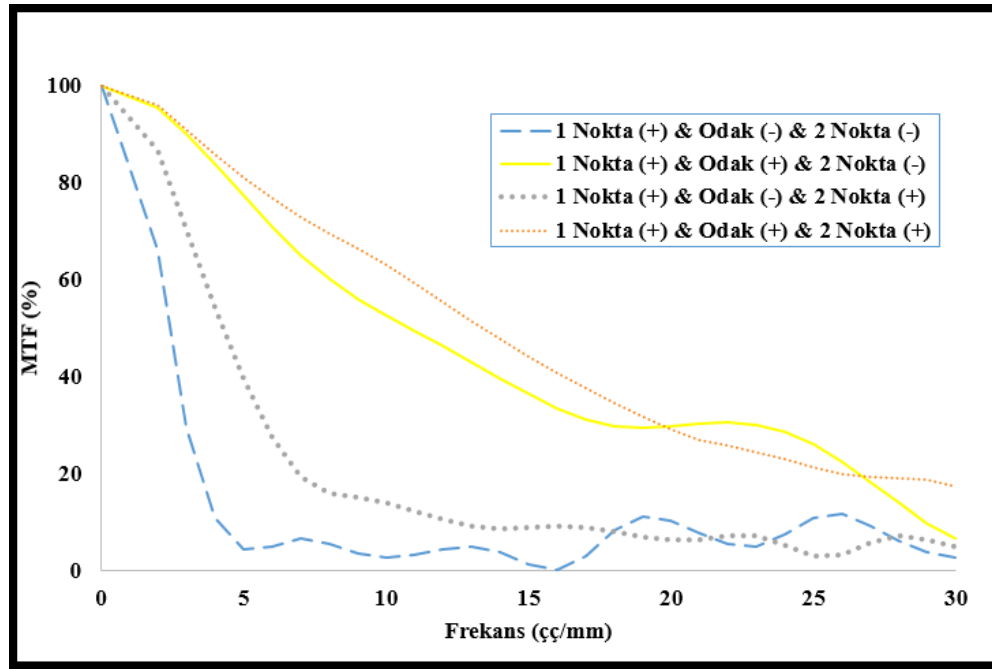
Görüntünün odaklı veya 2 nokta normalizasyon uygulanıp uygulanmadığına bağlı olarak alınan MTF sonuçları için Eş.3.9’da belirtilen kök ortalama kare sapma hesabı yapılmıştır. Bu hesaba göre görüntü normalizasyona ve görüntünün odaklı olup olmamasına bağlı oluşan sapma Çizelge 3.2.’de gösterilmiştir.



Şekil 3.25. a) Normalizasyon Uygulanmadan Önceki Görüntü b) 1 Nokta Normalizasyon Uygulanan Odaksız Görüntü c) 1 Nokta Normalizasyon Uygulanan Odaklı Görüntü d) 1 Nokta ve 2 Nokta Normalizasyon Uygulanan Odaksız Görüntü e) 1 Nokta ve 2 Nokta Normalizasyon Uygulanan Odaklı Görüntü

Çizelge 3.2. Görüntü Normalizasyonuna ve Odaklı Olmasına Göre Sapma Çizelgesi

Karşılaştırma Niteliği #1	Karşılaştırma Niteliği #2	MTF Sonucunda Değişim (%)
1 Nokta (+) & 2 Nokta (-) & Odak (-)	1 Nokta (+) & 2 Nokta (-) & Odak (+)	40,06
1 Nokta (+) & 2 Nokta (+) & Odak (-)	1 Nokta (+) & 2 Nokta (+) & Odak (+)	33,51
1 Nokta (+) & Odak (-) & 2 Nokta (-)	1 Nokta (+) & Odak (-) & 2 Nokta (+)	15,57
1 Nokta (+) & Odak (+) & 2 Nokta (-)	1 Nokta (+) & Odak (+) & 2 Nokta (+)	6,44



Şekil 3.26. Görüntü Normalizasyonu Uygulanma Durumuna Göre Hesaplanan MTF Sonuçları

3.5. Kolimatör Sisteminin MTF Ölçümüne Etkisi

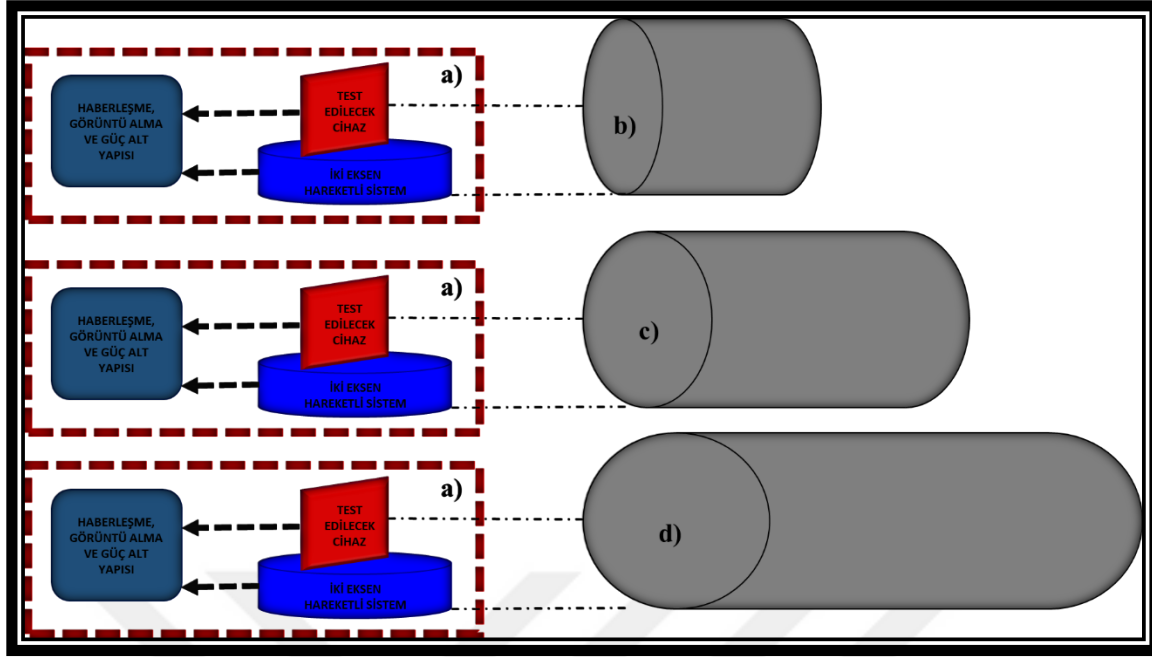
Bu çalışmada, MTF hesabında kullanılacak görüntünün alınması sırasında kullanılan kolimatörün sonuçlara etkisi gösterilmiştir. Bu bağlamda, farklı uzunluktaki kolimatör sistemlerinden görüntüler alınmıştır. Görüntüler alınırken, termal kaynak olarak kullanılan kara cisim sıcaklığı da değiştirilmiştir. Kolimatör uzunluğuna, kolimatörün $f/\#$ sayısına ve kara cisim farksal sıcaklığına bağlı karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sırada 3.4. bölümünde anlatılan deneyde kullanılan; 17 μm piksel aralığı bulunan bolometrik dedektörün bulunduğu, 12 μm dalga boyunda çalışan ve $f/1,4$ sayısı değerine sahip bir

görüntüleme sistemi kullanılmıştır. Bu görüntüleme sistemine bağlı olarak; hesaplanan MTF sonuçlarının gösterildiği grafiklerde 29,41 çç/mm maksimum frekans olarak belirtilmiştir. Yapılan ölçüm ve hesaplamalarda; görüntünün eş bir şekilde odaklı olması, hedefin görüntünün merkezinde olması ve hesaplamalarda kullanılan kesit alanının eş olması sağlanmıştır.

3.5.1. Farklı kolimatör sistemlerinden farklı kara cisim farksal sıcaklığı altında görüntülerin alınması

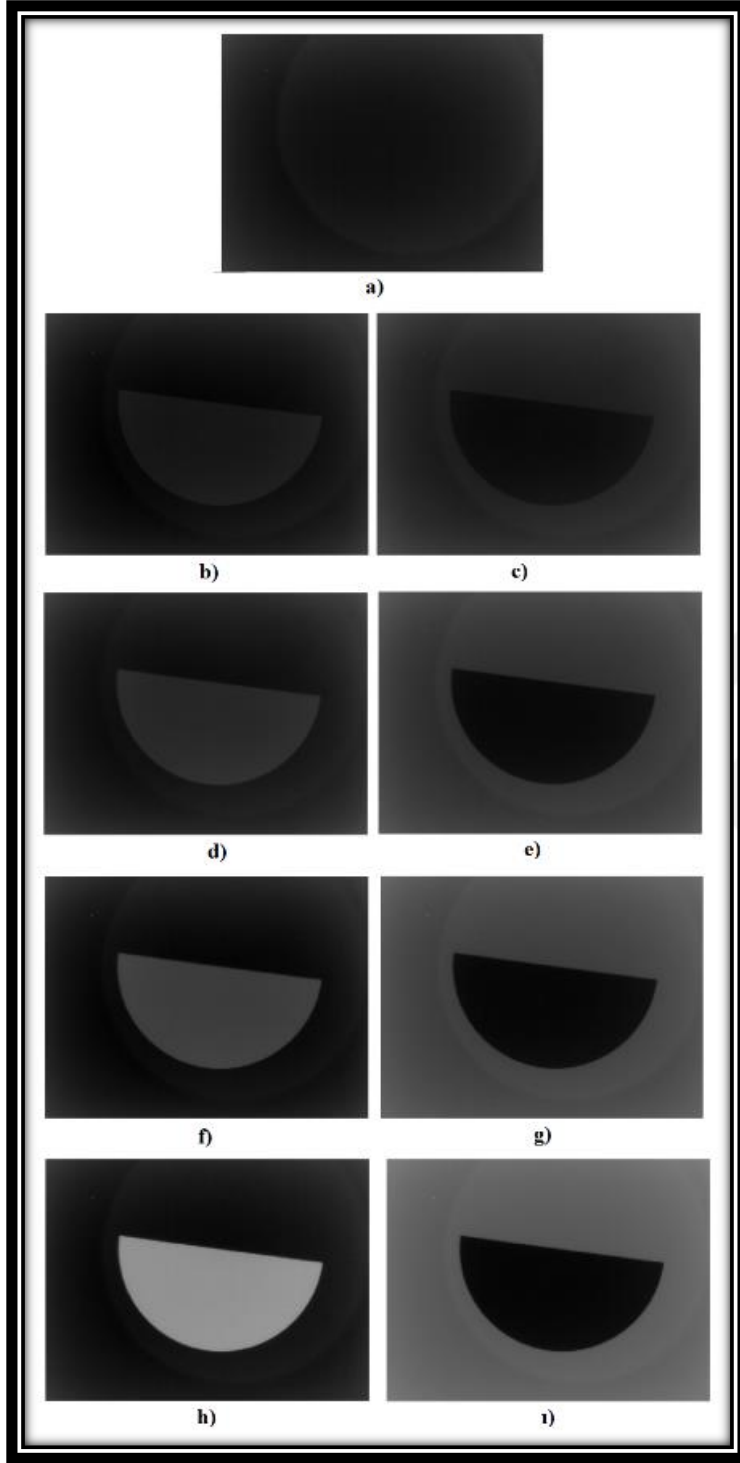
Ölçümlerde kullanılan yarım ay hedefin bir yarısı kara cisim kaynağının enerjisini direkt iletebilmek için boş bir yapıdadır. Diğer yarısı ise ortam sıcaklığında kalmasını sağlayacak şekilde özel bir boya ile boyanmıştır. Bu sayede, termal görüntüleme sistemlerinin sıcaklık farkına bağlı olarak hedefi algılayabilmesi sağlanmıştır. Yarım ay hedefin iki yarısı arasında sıcaklık farkı olmadığında termal görüntüleme sistemi için anlamlandırarak bir hedef görüntüsü olmadığı Şekil 3.28.a., Şekil 3.29.a. ve Şekil 3.30.a’da belirtilen görsellerde anlaşılmaktadır.

Kolimatör sisteminin, MTF sonuçlarına etkisinin anlaşılabilmesi için Şekil 3.26.’da gösterilen alt yapı hazırlanmıştır. Hazırlanan alt yapıda, test edilecek cihaz ve cihazın elektronik ve mekanik bağlantıları değiştirilmeksizin, farklı özelliklerdeki kolimatörlerden görüntü alınması sağlanmıştır. Her bir kolimatör sistemi içerisinde aynı özellikteki kalibreli kara cisimler bulunmaktadır.



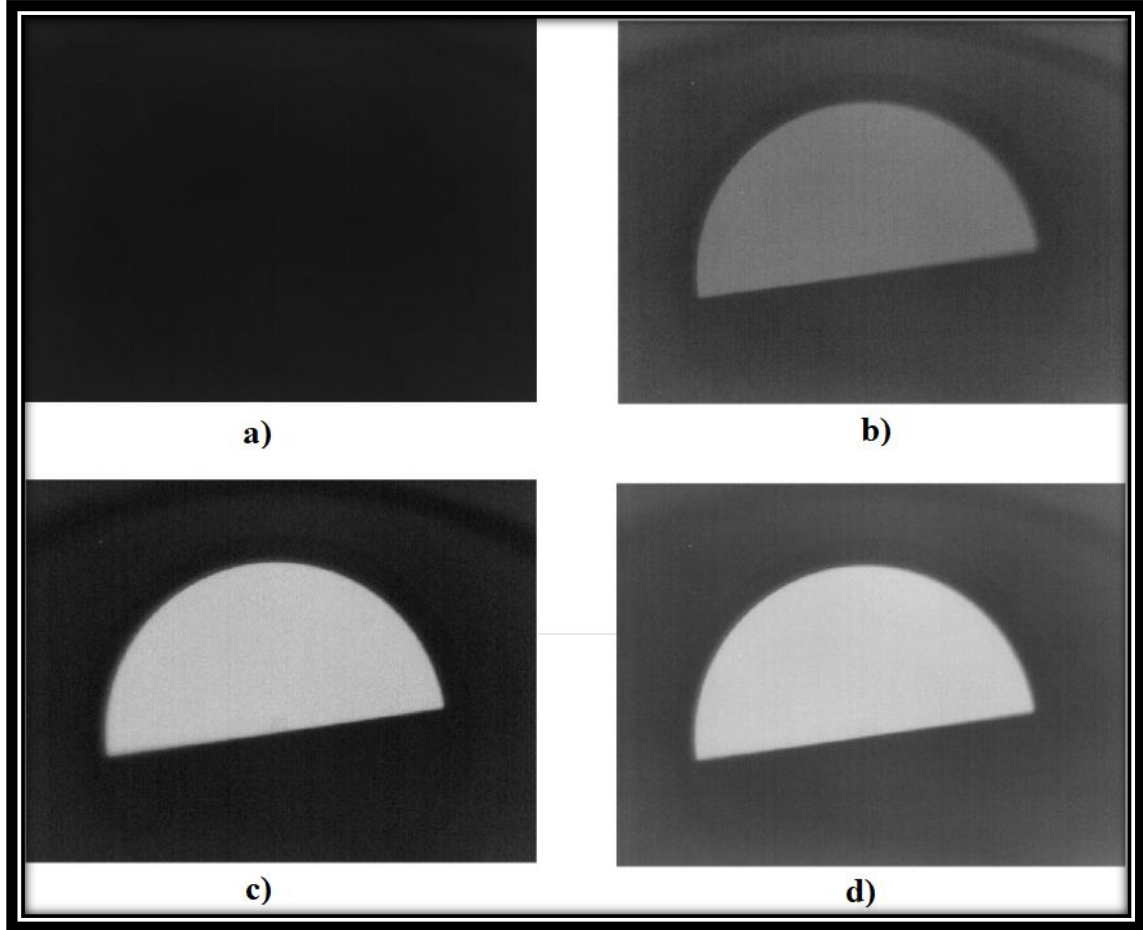
Şekil 3.27. Deney Düzeneği#3 – Kullanılan Kolimatörün Etkisini Ölçmek İçin Hazırlanan Düzenek a) Test Edilecek Cihazdan Görüntü Almak İçin Hazırlanan Alt Yapı b) 1 metre uzunluğundaki $f/5$ sayı değerine sahip kolimatör c) 1,5 metre uzunluğundaki $f/5$ sayı değerine sahip kolimatör d) 3 metre uzunluğundaki $f/10$ sayı değerine sahip kolimatör

İlk olarak Şekil 3.27.b.’de belirtilen kolimatör sisteminden görüntüler alınmıştır. Kara cisim farksal sıcaklık değeri sırasıyla 0°C , 2°C , -2°C , 4°C , -4°C , 6°C , -6°C , 10°C , -10°C olarak ayarlanmış ve Şekil 3.27.’de gösterilen görüntüler kaydedilmiştir.

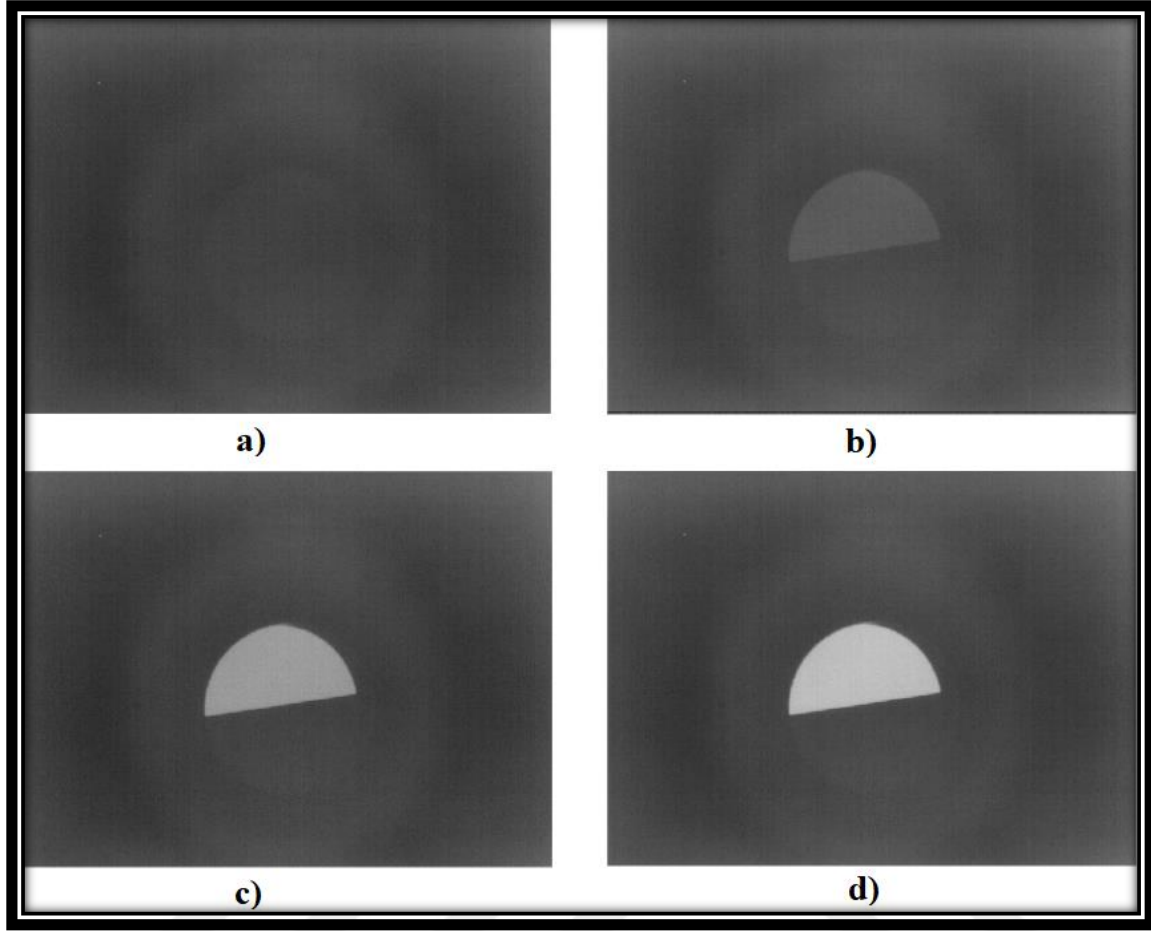


Şekil 3.28. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.24.b’de Belirtilen Kolimatörden Alınan Görüntüler
Kara Cisim Farksal Sıcaklığı: a) 0°C b) 2°C c) -2°C d) 4°C e) -4°C f) 6°C
g) -6°C h) 10°C ı) -10°C

Daha sonra aynı işlem Şekil 3.27.c’de ve Şekil 3.27.d’de belirtilen kolimatör sistemleri ile tekrarlanmış ve 0°C, 2°C, 4°C, 6°C kara cisim farksal sıcaklıklarına göre kaydedilen görüntüler Şekil 3.29.’da ve Şekil 3.30.’da gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.26.c’de Belirtilen Kolimatörden Alınan Görüntüler
Kara Cisim Farksal Sıcaklığı: a) 0°C b) 2°C c) 4°C d) 6°C

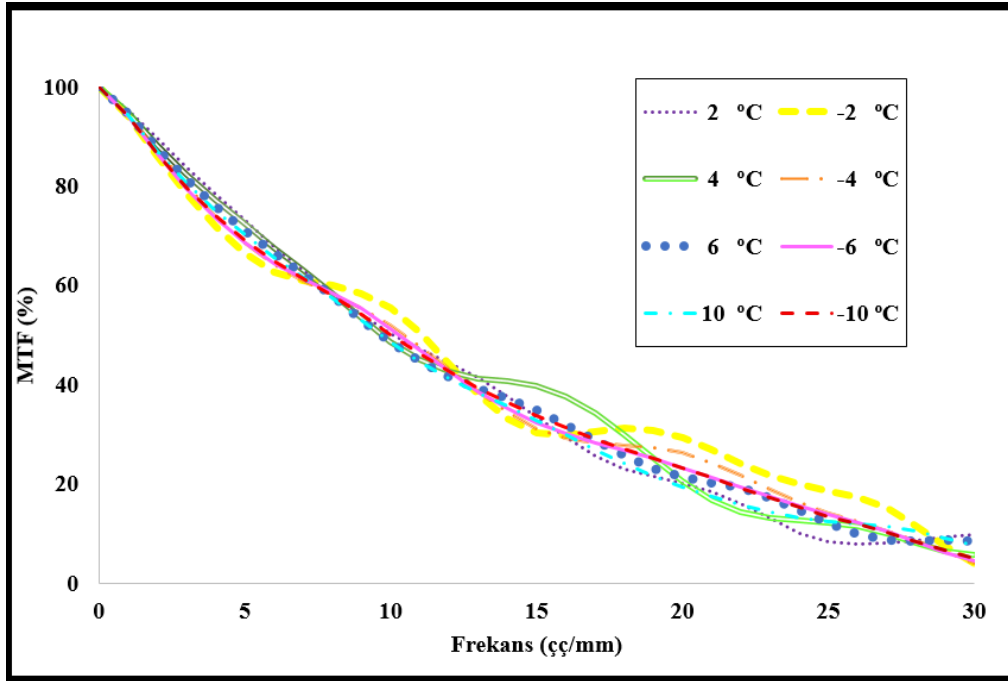


Şekil 3.30. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.26.d’de Belirtilen Kolimatörden Alınan Görüntüler
Kara Cisim Farksal Sıcaklığı: a) 0°C b) 2°C c) 4°C d) 6°C

3.5.2. Farklı kolimatör sistemlerinden farklı kara cisim farksal sıcaklığı altında alınan görüntülere ait mtf sonuçlarının karşılaştırmalı grafiklerinin elde edilmesi

Şekil 3.28.’de belirtilen Deney Düzeneği#3’ten alınan görüntülere ait MTF sonuçları hesaplanmıştır. Kara cisim farksal sıcaklığının etkisinin görülebilmesi için, aynı kolimatör sistemindeyken farklı kara cisim farksal sıcaklıklarında alınan görüntülerin MTF sonuçları Şekil 3.31., Şekil 3.32. ve Şekil 3.33.’te gösterilmiştir.

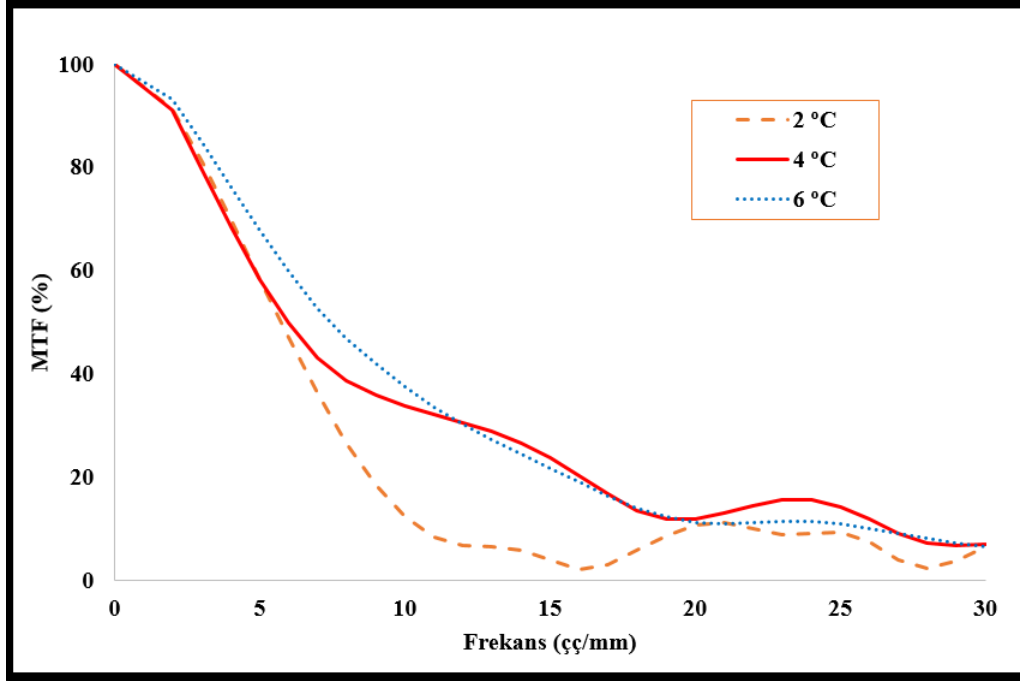
Kara cisim farksal sıcaklığının pozitif veya negatif yönde değişimine bağlı olarak alınan MTF sonuçları için Eş.3.9’da belirtilen kök ortalama kare sapma hesabı yapılmıştır. Bu hesaba göre sıcaklık yönüne bağlı oluşan sapma Çizelge 3.3.’te gösterilmiştir.



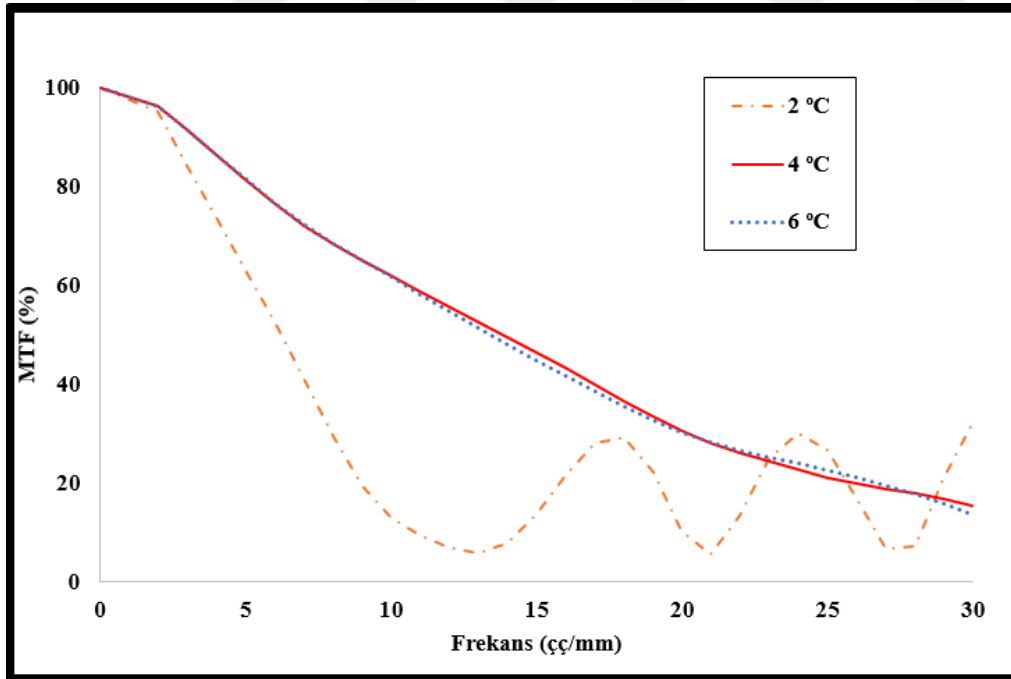
Şekil 3.31. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.27.b’de Belirtilen Kolimatörden Farklı Kara Cisim Farksal Sıcaklıklarında Alınan Görüntülerin Karşılaştırılması

Çizelge 3.3. Kara Cisim Farksal Sıcaklık Değişim Yönüne Göre MTF Değişimi

Kara Cisim Farksal Sıcaklığı (°C)	Sıcaklık Değişim Yönüne Göre MTF Sonucunda Değişim (%)
2	6,22
4	4,24
6	1,67
10	1,91



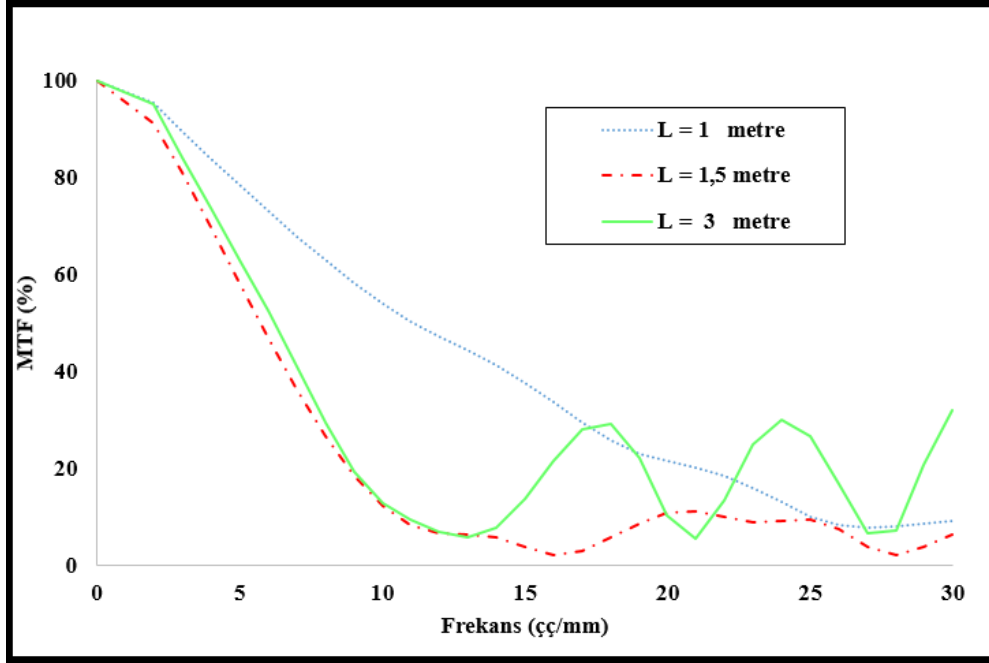
Şekil 3.32. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.27.c’de Belirtilen Kolimatörden Farklı Kara Cisim Farksal Sıcaklıklarında Alınan Görüntülerin Karşılaştırılması



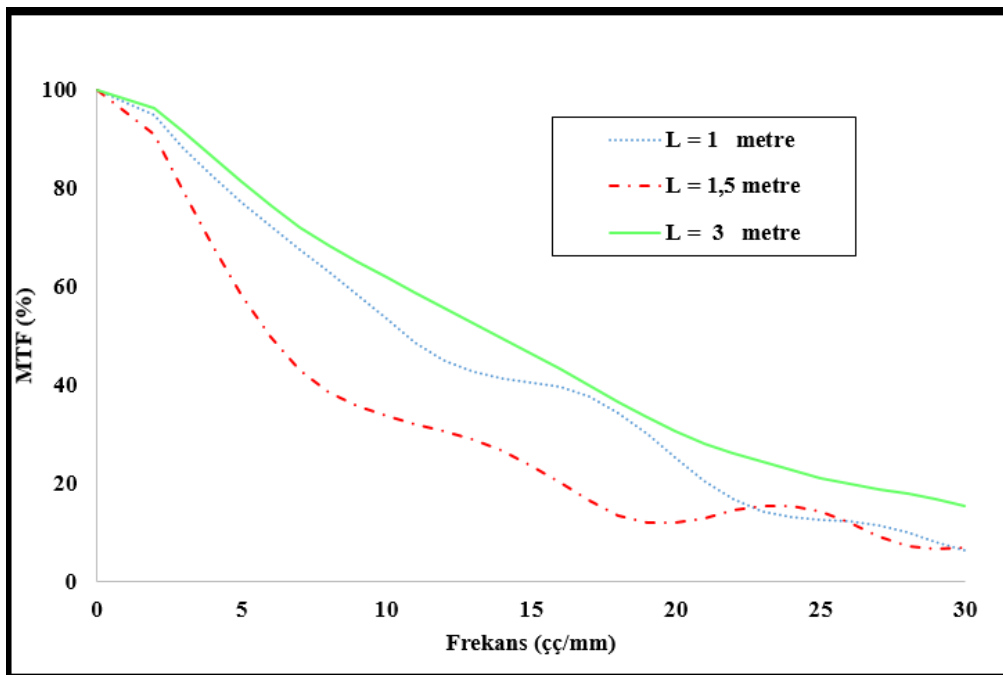
Şekil 3.33. Deney Düzeneği#3 Şekil 3.27.d’de Belirtilen Kolimatörden Farklı Kara Cisim Farksal Sıcaklıklarında Alınan Görüntülerin Karşılaştırılması

Kolimatör uzunluğunun (L) ve bu uzunluğa bağlı olan $f/\#$ değerinin etkisinin görülebilmesi için her bir kara cisim farksal sıcaklık değerlerinde her bir kolimatör sistemlerinden alınan

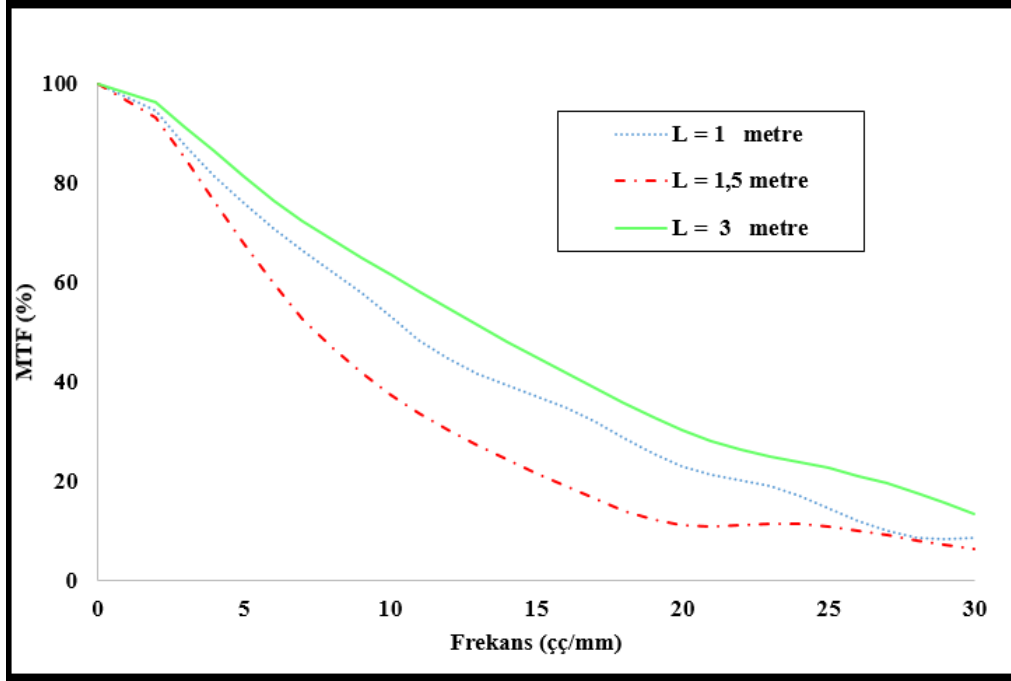
görüntülerin MTF sonuçları Şekil 3.34., Şekil 3.35. ve Şekil 3.36.'daki gibi karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.34. Deney Düzeneği#3 - Kara cisim Farksal Sıcaklığı 2°C İçin Şekil 3.27.b., Şekil 3.27.c ve Şekil 3.27.d Kolimatörlerinden Alınan Görüntülerin MTF Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 3.35. Deney Düzeneği#3 - Kara cisim Farksal Sıcaklığı 4°C İçin Şekil 3.27.b., Şekil 3.27.c ve Şekil 3.27.d Kolimatörlerinden Alınan Görüntülerin MTF Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 3.36. Deney Düzeneği#3 - Kara cisim Farksal Sıcaklığı 6°C İçin Şekil 3.27.b., Şekil 3.27.c ve Şekil 3.27.d Kolimatörlerinden Alınan Görüntülerin MTF Sonuçlarının Karşılaştırılması

3.6. Gerçekleştirilen Deneylerin Değerlendirilmesi ve Kullanıcı Ara Yüzünde Yer Alması Gereken Parametrelerin Belirlenmesi

Bu çalışmada, Bölüm 3.3., 3.4. ve 3.5.'te yapılan deneyler ışığında, termal objektiflerin eğik kenar yöntemi ile MTF ölçümü sırasında etkilenebileceği parametreler göz önünde bulundurularak, hem tasarımcıların hem de üretim personelinin kullanabileceği bir kullanıcı ara yüzü geliştirilmesinde nasıl bir yol izlenmesi gerektiği anlatılmıştır. Tasarımcıların kullanabileceği ara yüzün anlatıldığı bölümde, ölçüm sırasında etkili olabilecek parametrelerin değiştirilmesi ve ölçümü yapılacak cihaza göre kaydedilebilmesinin sağlanması hedeflendiğinde ara yüzde olması gereken parametreler anlatılmıştır. Üretim personelinin kullanımı için geliştirilecek bölümde ise ölçüm yapılacak cihaza göre daha önce kaydedilmiş parametrelere uygun hazırlık yapılması ve buna göre ölçüm yapılabilmesi hedeflendiğinde ara yüzde yer alması gereken parametreler anlatılmıştır.

3.6.1 Tasarımcılar için kullanıcı ara yüzü

Termal objektiflerin eğik kenar yöntemi ile MTF ölçümü sırasında, kullanılacak objektife ve ölçüm ortamına bağlı olarak etkileyecek parametrelerin değerlerine tasarımcı tarafından

karar verilmesi gerekmektedir. Tasarımcılar için kullanıcı ara yüzü geliştirilmesi, tasarımcıların bu parametre değerlerine karar vermesi ve farklı parametrelere göre çıkan sonuçları kaydedebilmesi hedefiyle gerçekleştirilmelidir.

Tasarımcıların kullanacağı kullanıcı ara yüzünde, öncelikle ölçüm yapılacak cihaza ait tüm bilgilerin girilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, Şekil 3.37.a’da gösterilen “Objektif” başlığı objektife ait temel teknik bilgilerin girilmesi için belirtilmiştir.

Objektiften görüntüyü almak için kullanılan dedektöre tasarımcı tarafından karar verilmesi gerekmektedir. Şekil 3.37.b’de gösterilen “Dedektör” başlığı MTF ölçümünün gerçekleştirilmesi sırasında kullanılacak dedektöre ait teknik bilgilerin girilmesi için belirtilmiştir.

Bölüm 3.5.’te gerçekleştirilen deneyde ise kolimatör sisteminin özelliklerinin ve kara cisim farksal sıcaklığının etkisi görülmüştür. Bu bağlamda, Şekil 3.37.c’de gösterilen bölüm kolimatöre ait teknik bilgilerin girilmesi için belirtilmiştir. Ölçüm sırasında kullanılacak kara cisim de kolimatör sistemine dahil olduğu için kara cisim farksal sıcaklığının belirtilmesi de aynı başlık altında toplanmıştır.

Bölüm 3.3’te gerçekleştirilen deneyde araştırılan parametreler olan kullanılacak hedefin eğimi, kaydedilen görüntüde kullanılacak kesit alanı ve kaydedilecek sahne sayısı hakkındaki bilgilerin girilmesi için Şekil 3.37.d’de “Kaydedilen Görüntü” başlığı altında belirtilmiştir. Sahnelenen hedef görüntüsünde ölçülen hedef eğiminin güncellenmesi için ise aynı başlık altında “Güncelle” butonunun belirtimine yer verilmiştir.

Ölçüm düzeneğinde kullanılan mekanik parçalar, ölçümü yapılan objektife, kullanılan dedektöre ve ölçüm ortamı olan kolimatör sistemine göre farklılık göstermektedir. Tüm bu değişkenler göz önünde bulundurularak her bir ölçüm ortamı için mekanik aparatlar uygun şekillerde tasarlanmalıdır. Bu tasarımlara ait parça numaralarının girilebilmesi için Şekil 3.37.e’de “Mekanik Parça Numaraları” başlığı altındaki alan belirtilmiştir.

Ölçüm düzeneğinde yer alan tüm değişkenlere ait girişler yapıldıktan sonra bu girdiler doğrultusunda MTF hesabının yapılabilmesi için 3.37.f’de “MTF Hesapla” butonu belirtilmiştir. Bu hesap için yer alan girişlerin kaydedilmesi için ise 3.37.g’de “Parametreleri

Kaydet” butonu belirtilmiştir. “Parametreleri Kaydet” butonunun amacı; tasarımcı ekranında yer alan mevcut girdilerin üretim personeli ekranına aktarılmasını sağlamaktır.

The screenshot displays the 'MTF HESAPLAMA ARAYÜZÜ' (MTF Calculation Interface) with the following sections and fields:

- a) Objektif (Objective):** Parça No: [], Dalga Boyu: [] Mikrometre, Açıklık Boyutu: [] Mikrometre, Odak Uzaklığı: [] Mikrometre.
- b) Dedektör (Detector):** Parça No: [], Piksel Aralığı: [] Mikrometre, Görüntü Boyutu: [] x [] Piksel.
- c) Kolimatör Sistemi (Collimator System):** Parça No: [], Dalga Boyu: [] Mikrometre, Açıklık Boyutu: [] Mikrometre, Odak Uzaklığı: [] Mikrometre, Kara Cisim Farklılık Sıcaklığı: [] Santigrad Derece.
- d) Kaydedilen Görüntü (Recorded Image):** Kullanılacak Kesit: [] x [] Piksel, Hedef Eğimi: [] Derece, Çerçeve Sayısı: [], Güncelle button.
- e) Mekanik Parça Numaraları (Mechanical Part Numbers):** Bağlantı Aparatı: [], Hızlama Aparatı: [], Hedef: [].
- f) MTF Hesapla (Calculate MTF) button.**
- g) Parametreleri Kaydet (Save Parameters) button.**

Şekil 3.37. Tasarımcılar İçin Hazırlanacak Kullanıcı Ara Yüzünde Bulunması Gereken Parametreler a) Ölçüm Yapılacak Objektif İçin Bilgi Girişi b) Ölçümde Kullanılan Dedektör İçin Bilgi Girişi c) Kullanılan Kolimatör Sistemi İçin Bilgi Girişi d) Kaydedilen Görüntü Özellikleri İçin Bilgi Girişi e) Kullanılan Mekanik Parçalar İçin Bilgi Girişi f) MTF Hesaplama Butonu g) Parametreleri Kaydetme Butonu

3.6.2 Üretim personeli için kullanıcı ara yüz

Tasarımcılar için hazırlanacak kullanıcı ara yüzünde, bütün parametrelerin değişim kontrolünün erişilebilir olması gerekiyordu. Üretim personeli için hazırlanan kullanıcı ara yüzünde ise parametrelerin değişime ihtiyaç olmadan sadece yönlendirici bilgi vermesi gerekmektedir. Böylece, ölçüm düzeneği her termal objektif modeli için eş bir şekilde hazırlanarak, aynı koşullarda ölçüm yapılması sağlanacaktır. Bununla birlikte, seri üretim alt yapılarında üretim personelinin inisiyatifine kalmaksızın kurulup ölçüm alınabilecek alt yapıların hazırlanmış olması gerekmektedir. Bu nedenle Şekil3.38.’de gösterildiği gibi

kullanıcı ara yüzünde başlıklar altında direkt giriş yapılabilecek metin kutuları yerine sadece daha önce tasarımcı tarafından kaydedilmiş hallerine erişilebilecek seçim kutuları yer almaktadır.

Öncelikle üretim testleri yapılacak olan termal objektifin hangi model olduğu seçilmelidir. Şekil.3.38.a’da objektif başlığı altında belirtilen alan bu seçimi ifade etmektedir. Daha sonra bu seçime göre uygun olabilecek, kaydedilmiş dedektörler arasından Şekil.3.38.b.’de “Dedektör” başlıklı alanda belirtildiği gibi seçim yapılabilir. Aynı işlem Şekil.3.38.c.’de gösterildiği gibi kolimatör sistemi için de yapılabilir. Bu seçimler akabinde üretim personelinin hazırlaması ve kontrol etmesi gereken bilgiler kullanıcı ara yüzünde belirtilmelidir. Bu bilgiler “Kara Cisim Farksal Sıcaklığı” ve ölçüm düzeneğinde yer alan “Mekanik Parça Numaraları”dır. Tüm bu seçim ve kontrol işlemlerinden sonra Şekil 3.38.e.’de belirtilen “MTF HESAPLA” butonuna basılarak MTF sonucu alınabilir.

The screenshot shows the 'MTF HESAPLAMA ARAYÜZÜ' (User Interface) with the 'Üretim' (Production) tab selected. The interface contains several input fields and a calculation button, all highlighted with red boxes and labeled a) through e). The 'Tasarım' (Design) tab is also visible but not selected.

- a) Objektif Parça No: [Dropdown menu]
- b) Dedektör Parça No: [Dropdown menu]
- c) Kolimatör Sistemi Parça No: [Dropdown menu]
Kara Cisim Farksal Sıcaklığı: [Input field] Santigrad Derece
- d) Mekanik Parça Numaraları
Bağlantı Aparatı: [Input field]
Hizalama Aparatı: [Input field]
Hedef: [Input field]
- e) MTF HESAPLA [Button]

Şekil 3.38. Üretim Personeli İçin Hazırlanacak Kullanıcı Ara Yüzünde Bulunması Gereken Parametreler a) Ölçüm Yapılacak Objektif İçin Seçim Alanı b) Ölçümde Kullanılan Dedektör İçin Seçim Alanı c) Kullanılan Kolimatör Sistemi İçin Seçim Alanı d) Kullanılan Mekanik Parça Numaraları İçin Seçim Alanı e) MTF HESAPLA Butonu



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Modülasyon aktarım işlevi, optik sistemin uzaysal frekans içeriğini nesne sahnesinden görüntü düzlemine doğru bir şekilde aktarabilme yeteneği hakkında bilgi sağlayan ve bir optik sistemin performansını karakterize etmek için önemli parametre olarak kabul edilen bir ölçüdür. Başka bir deyişle MTF, optik sistem çözünürlüğü ve nesne ayrıntılarını ayırt etme yeteneği hakkında bilgi sağlamaktadır.

Optik sistemin tamamında kullanıldığı gibi dedektör ve objektif olan optik sistemin alt elemanlarında da kaliteyi belirleyen ölçüm yöntemi olarak MTF kullanılmaktadır. Bu çalışmada, farklı hesaplama yöntemlerine sahip olan MTF ölçümünün, eğik kenar hesaplama yöntemi kullanılarak termal objektiflerde uygulaması yapılmıştır. Uygulamaların çıktıları ile MTF sonucunu etkileyen parametlerin neler olduğu belirlenmiştir. Bu parametrelere göre hem tasarımcılar hem de üretim personeli için kullanılabilecek bir kullanıcı ara yüzünün nasıl olması gerektiğine dair akış hazırlanmıştır.

Bölüm 3.2.'de hazırlanan Deney Düzeneği#1 ile alınan ölçümler sonucunda yapılan hesaplamalar, kullanılan matematiksel yöntemin doğruluğunu göstermektedir. Şekil 3.13.'te belirtilen grafikte Kontrol Grubu ve Deney Grubu eğrilerinin örtüşür durumda olması ve hesaplanan MTF sonucunun sapmalarının yatay hedef için %2,18, dikey hedef için %1,96 olması yöntem doğruluğunu gösteren çıktıları ifade etmektedir.

MTF hesabı için kullanılacak kesit alanı, sınır dağılım fonksiyonunun hesaplanması için giriş değerini oluşturmaktadır. Kontrast geçişindeki netliğin önemli olduğu bu hesap devamında türevden kaynaklı gürültünün etkisiyle kenar geçiş fonksiyonunu ve dolayısıyla MTF'si de etkilemektedir. Şekil 3.16. gösteriyor ki, MTF hesabı için kullanılacak kesit alanı geçişin net bir şekilde görüleceği kadar geniş olmalı ve bir sonraki aşamada uygulanacak türevi etkilemeyecek kadar dar olmalıdır.

Hesaplama için belirlenen kesit alanında, dedektör tepkisine bağlı hataların elimine edilmek istenmesinden dolayı hedefe açı verilmek istenmektedir. Şekil 3.18. sadece açığa bağlı olarak MTF sonucunun değişime uğrayacağı görülmektedir. MTF değerinin doğru hesaplanabilmesi için, test edilmek istenen sistemde kullanılan dedektörün piksel aralığına ve kesit boyutuna bağlı olarak açı değerine karar verilmelidir.

Kaydedilen görüntünün çerçeve sayısı az olduğunda, görüntü alma sırasında bulunan sabit gürültünün ayırt edilme gücü azalacak ve görüntü netliği de buna bağlı olarak azalacaktır. Şekil 3.21.'de görüldüğü gibi örneklemeye bağlı MTF sonuçları arasındaki fark 50 örneklemeden itibaren azalmaktadır. Şekil 3.23. görüntüdeki ise odağın bozulmasına bağlı olarak MTF sonucunun doğrudan etkileneceğini göstermektedir.

Dedektörün idealdeki teorik MTF değeri kullanılarak, lens için MTF ölçümü yapıldığında; Şekil 3.24.'te gösterilen grafiğe göre lensin teorik MTF değerinden %43,07 sapma oluşmaktadır. Bu bağlamda, kullanılan dedektörün kalibrasyonlu ve ölçülebilir olmamasının lens MTF sonucuna olumsuz etkisi olduğu görülmektedir.

Dedektör kalibrasyonun etkisinin sonuçları ise Şekil 3.26.'da ve Çizelge 3.2.'de gösterilmektedir. Termal dedektörlerde kalibrasyon için kullanılan 2 nokta normalizasyon yönteminin uygulanmasından önce odak durumuna göre MTF sonucunda %40,06; 2 nokta normalizasyon yönteminin uygulanmasından sonra odak durumuna göre MTF sonucunda %33,01 değişim olduğu görülmektedir. Odaksız bir görüntüde 2 nokta normalizasyonun uygulanma durumuna göre %15,57'lik bir değişim olurken; odaklı görüntüde 2 nokta normalizasyonun uygulanma durumuna göre %6,44'lük bir değişim olmaktadır. Bu değişimler hem görüntünün odaklı olmasının hem de dedektör kalibrasyonun yapılmış olmasının önemli olduğunu göstermektedir.

Yarım ay hedef ile eğik kenar yöntemi kullanılarak yapılan MTF ölçümü kolimatör sisteminde yapılmaktadır. Dolayısıyla kullanılan kolimatör sistemi yani ölçüm ortamı da MTF sonucunu etkileyen bir diğer etmendir. Bölüm 3.5.'te, 3 farklı kolimatör sistemi ile gerçekleştirilen deneyler bu etmenin etkisini göstermektedir. Kullanılan kolimatör sistemlerinin etkin odak uzaklıkları ve $f/\#$ değerleri farklı olmakla birlikte kara cisim farksal sıcaklık değerlerinin de değiştirilerek etkisinin görülmesi sağlanmıştır. Bu bağlamda, Şekil 3.31. gösteriyor ki kara cisim farksal sıcaklığının pozitif veya negatif yönde değişkenlik göstermesi, kara cisim ışımasına bağlı olarak termal görüntünün algılanma kalitesinde de etki etmektedir ve çizelge 3.3.'te belirtildiği gibi hazırlanan deney düzeneğinde %1,67 ile %6,23'lük arasındaki değişim ile MTF sonucunu etkileyebilmektedir. Şekil 3.31., 3.32., 3.33.'te bulunan grafikler gösteriyor ki farklı kolimatörlerden farklı kara cisim sıcaklıklarında alınan görüntüler en iyi sonucu verebilmektedir. Şekil 3.34., 3.35., 3.36.'da bulunan grafikler ise aynı kara cisim farksal sıcaklıklarında farklı kolimatörlerin en iyi

sonucu verdiğini göstermektedir. Bu durumlar, MTF ölçümü kolimatör seçimi yaparken kolimatörde bulunan kara cismin de hangi sıcaklıkta olması gerektiğine karar verilmelidir.

Hazırlanan tüm bu deney düzeneklerinden alınan ölçümler ve yapılan karşılaştırmalar, termal objektiflerde eğik kenar yöntemi kullanılarak MTF ölçümü için hazırlanacak ortamın ve kullanılacak ürünlerin tasarımcı tarafından belirlenmiş olması gerektiğini göstermektedir. Bu sebeple, tasarımcılar için hazırlanan kullanıcı ara yüzünden bütün parametrelerin kontrolünün sağlanabilmesi ve hazırlanan konfigürasyonun kaydedilebilmesi gerekmektedir. Böylece tasarımcılar farklı parametreler için sonuçları kaydederek karşılaştırabilecektir ve seri üretim için aktarılabilecek konfigürasyona karar verebilecektir.

Seri üretim alt yapısında kullanılacak ara yüzde ise operatörün karar vermesi veya inisiyatif alması gereken durumların oluşmaması gerekmektedir. Bu bağlamda, üretim personeli için hazırlanan kullanıcı ara yüzünde, kullanılacak ürünler seçildikten sonra üretim personelinin ortamı hazırlamasına yönelik bilgilendirici göstergeler bulunması gerekmektedir. Böylece ölçüm ortamının uygun şekilde hazırlanarak sonuçların sağlıklı bir şekilde alınması sağlanabilecektir.

Bu çalışmada, termal objektiflerin eğik kenar yöntemi kullanılarak MTF ölçümünün yapılması durumunda ölçümü etkileyecek parametreler araştırılmıştır. Bu parametrelerden biri de kullanılacak olan dedektöre ait ölçülerek kaydedilen MTF sonuçlarıdır. Bu bağlamda gelecek çalışmalarda termal dedektörlerin eğik kenar yöntemi kullanılarak MTF ölçümünün yapılması ve sonucu etkileyen parametreler araştırılabilir. Ek olarak, tasarımı gerçekleşen ölçüm alt yapılarının seri üretime kazandırılması için elektronik ve arayüz yazılımı tabanlı çalışmalar gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

1. Vollmer, M., and Möllmann, K. P. (2010). *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications*. (2). New Jersey: John Wiley and Sons, 1-97.
2. Akula, A., Ghosh, R. and Sardana, H. K. (2011, October). *Thermal imaging and its application in defence systems*. AIP conference proceedings, Kerela, India, 335.
3. Rai, M., Maity, T., and Yadav, R. K. (2017, July). Thermal imaging system and its real time applications: a survey. *Journal of Engineering Technology*, 6(2), 290-303.
4. Holst, G. C., and McHugh, S. W. (1992, September). *Review of thermal imaging system performance*. Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing III, International Society for Optics and Photonics, 78-84.
5. Rogalski, A. W., Kopytko, M. E., and Martyniuk, P. M. (2018). *Antimonide-based infrared detectors: a new perspective*. (1). Washington: SPIE, 1-32.
6. Lloyd, J. M. (1975). *Thermal Imaging Systems*. Springer Science & Business Media, New York: Springer Science+Business Media, 7-14.
7. Aldave, I. J., Bosom, P. V., González, L. V., De Santiago, I. L., Vollheim, B., Krausz, L., and Georges, M. (2013). Review of thermal imaging systems in composite defect detection. *Infrared Physics & Technology*, 61, 167-175.
8. Çalışan, M. ve Türkoğlu, İ. (2011). *Termal Kameralar ve Uygulamaları*, Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu, Elazığ, 46-50.
9. Doğan, A. (2019). *Hassas Gündümlü Sistemler için İki Bant Kızılötesi Arayıcı Başlık Optik Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
10. Polat, M., ve Ebru, G. Değişken Odaklı Optik Görüntüleme Sistemi Tasarımı ve Üretimi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 353-369.
11. İnternet: F/# and depth of field. URL: <https://www.opto-e.com/basics/f-and-depth-of-field>, Son Erişim Tarihi: 02.02.2021.
12. Hanson, C. M. (2000, July). *Uncooled IR detector performance limits and barriers*. Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VI, AeroSense 2000, Orlando, FL, United States, 2-11.
13. Rogalski, A. (2002). Infrared detectors: an overview. *Infrared physics and technology*. 43(3-5), 187-210.
14. Kostrzewa, J., Nguyen, V. L., Hoelter, T. R., Högastén, N., Nussmeier, M., Kurth, E. A. and Sharp, B. (2018). U.S. Patent No. 9,900,526. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

15. Marcotte, F., Tremblay, P. and Farley, V. (2013, June). *Infrared camera NUC and calibration: comparison of advanced methods*. Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIV, SPIE Defense, Security, and Sensing, Baltimore, Maryland, United States, 25-35.
16. Patrice, F., Agnes, C. and Philippe, T. (2005, May). *Cooled IR detectors calibration analysis and optimization*. Infrared imaging systems: Design analysis modeling and testing XVI. Defense and Security, Orlando, Florida, United States, 343-354.
17. Kang, W. S. and Kong, H. B. (2019, June). *Improving the shutter NUC algorithm by changing the shutter position to achieve a small and lightweight system*. 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, JeJu, Korea (South), 1-4.
18. Aldave, I. J., Bosom, P. V., González, L. V., De Santiago, I. L., Vollheim, B., Krausz, L. and Georges, M. (2013). Review of Thermal Imaging Systems in Composite Defect Detection. *Infrared Physics and Technology*, 61, 167-175.
19. Stevens, E. G. and Lavine, J. P. (1994). An analytical, aperture, and two-layer carrier diffusion MTF and quantum efficiency model for solid-state image sensors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 41(10), 1753-1760.
20. Xu, D. and Zhang, X. (2012, August). *Study of MTF measurement technique based on special object image analyzing*. 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Chengdu, China, 2109-2113.
21. Ichikawa, K., Kodera, Y. and Fujita, H. (2006). MTF measurement method for medical displays by using a bar-pattern image. *Journal of the Society for Information Display*, 14(10), 831-837.
22. Turkmenoglu, M., Sengul, O. and Yalciner, L. (2012). MTF Measurements For The Imaging System Quality Analysis. *Gazi University Journal of Science*, 25(1), 19-28.
23. Burns, P. D. and Williams, D. (2002, April). *Refined slanted-edge measurement for practical camera and scanner testing*. IS&T's 2002 PICS Conference, Rochester, NY USA, 191-195.
24. Kaplan, E. (1997). U.S. Patent No. 5,629,766. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
25. Bardoux, A., Gimenez, T., Jamin, N. and Seve, F. (2017, November). *Dynamic MTF measurement*. International Conference on Space Optics, Rhodes Island, Greece, 18-24.
26. Viallefont-Robinet, F. and Léger, D. (2010). Improvement of the edge method for on-orbit MTF measurement. *Optics express*, 18(4), 3531-3545.
27. Higashide, R., Ichikawa, K., Kunitomo, H. and Sawada, M. (2008). Proposal and verification of presampled MTF measurement by simple analysis using the edge method. *Nihon Hoshasen Gijutsu Gakkai zasshi*, 64(4), 417-425.

28. Benbouzid, A., Kameche, M. and Laidi, K. (2012). *Estimation of system mtf of eo satellite by slanted edge method*. Advances in sensors, signals, visualization, imaging and simulation, Algeria, 7-9.
29. Masaoka, K. (2018). Accuracy and precision of edge-based modulation transfer function measurement for sampled imaging systems. *IEEE Access*, 6, 41079-41086.
30. Üncü Y. A. (2013). *Sayısal Radyolojik Görüntüleme Sistemleri İçin Görüntü İşleme Ve Değerlendirme Araçlarının Ve Kullanıcı Arayüzünün Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, Ankara.
31. Yusuf A. R. (2015). *Dijital Radyografik Görüntüleme Sistemlerinde Görüntü Kalitesi Metriklerinin İncelenmesi Ve Metriklerin Hesaplanması İçin Yazılım Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü, Ankara.
32. İnternet: Inframet Collimators, On Axis and Off Axis Collimators. URL: https://www.inframet.com/ir_collimators.htm#:~:text=Inframet%20manufactures%20a%20long%20series,sold%20as%20independent%20optical%20modules.&text=The%20on%2Daxis%20collimators%20have,a%20non%20transmitting%2C%20secondary%20mirror, Son Erişim Tarihi: 31.01.2021.
33. İnternet: Modular Electro-Optical Test Systems. URL: <https://www.ci-systems.com/Files/METS.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.01.2021.
34. Masaoka, K., Yamashita, T., Nishida, Y. and Sugawara, M. (2014). Modified slanted-edge method and multidirectional modulation transfer function estimation. *Optics express*, 22(5), 6040-6046.
35. Roland, J. K. (2015, February). *A study of slanted-edge MTF stability and repeatability*. Image Quality and System Performance, San Francisco, California, United States, 191-199.
36. Bull, D. R. (2014). *Communicating pictures: A course in Image and Video Coding*. USA: Academic press is an imprint of Elseiver, 110-120.
37. İnternet: Krutsch, R. and Tenorio, D. (June, 2011). Histogram equalization. *Freescall Semiconductor Application Note*, 0. Web: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4318.pdf> Erişim Tarihi: 03.03.2021.
38. İnternet: Project 1: Histograms Arthur Coste. URL: http://www.sci.utah.edu/~acoste/uou/Image/project1/Arthur_COSTE_Project_1_report.html, Son Erişim Tarihi: 03.02.2021.
39. İnternet: Histogram Equalization. URL: https://www.math.uci.edu/icamp/courses/math77c/demos/hist_eq.pdf, Son Erişim Tarihi: 03.02.2021.
40. Allen, T. T. (2006). *Introduction to engineering statistics and six sigma: statistical quality control and design of experiments and systems*. (3). Berlin: Springer, 218-221.

41. Li, T. and Feng, H. (2009, October). *Comparison of different analytical edge spread function models for MTF calculation using curve-fitting*. In MIPPR 2009: Remote Sensing and GIS Data Processing and Other Applications, Sixth International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition, Yichang, China, 398-405.
42. Mandy, A., Petkov, P., Gotchev, A. and Egiazarian, K. (2006, April). *Efficient spline-based image interpolation on a TI OMAP platform*. In Proc. of European DSP Education and Research Symposium (EDERS), Munich, Germany, 385-392.
43. Amanatiadis, A. and Andreadis, I. (2009). A survey on evaluation methods for image interpolation. *Measurement Science and Technology*, 20(10), 104015.
44. Şenel, H. G. (2007). Kenar Bulma İçin Topolojik Gradyan İşleçleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2), 135-158.
45. Grigoryan, A. and Agaian, S. (2018). Two general models for gradient operators in imaging. *Electronic Imaging*, 391(8), 1-8.
46. Liao, H., Li, H., Xu, C. And Nsn, S. (2017). Edge detection algorithm and implementation based on orientation gradient. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 01.
47. Kohm, K. (2004, July). *Modulation transfer function measurement method and results for the Orbview-3 high resolution imaging satellite*. ISPRS, USA, 12-23.
48. Hong, T. T. B., Tuyen, B. T., Tuan, P. M. and Tan, N. D. (2020). Image Quality Computation And Its Application For Earth Observation Optical Satellite. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 11(12), 2470-2479.
49. Viallefont-Robinet, F., Helder, D., Fraisse, R., Newbury, A., Van Den Bergh, F., Lee, D. and Saunier, S. (2018). Comparison Of MTF Measurements Using Edge Method: Towards Reference Data Set. *Optics Express*, 26(26), 33625-33648.
50. Burns, P. D., Williams, D., Griffith, J., Hall, H. and Cahall, S. (2020). Application of ISO Standard Methods To Optical Design For Image Capture. *Electronic Imaging*, 240(9), 1-7.
51. Van Zwanenberg, O., Triantaphillidou, S., Jenkin, R. and Psarrou, A. (2019). *Edge detection techniques for quantifying spatial imaging system performance and image quality*. IEEE/CVF Conference On Computer Vision And Pattern Recognition Workshops, California, 1871-1880.
52. İnternet: Kadiev, M. V. (May, 2020). *Using the Modulation Transfer Function as a Metric for Lens Sharpness*. University of Surrey Department of Music and Media Technical Project FVP3007. Web: <https://static1.squarespace.com/static/5a6cc045f43b5543ff203cda/t/5f18356f39df484acef70a3d/1595422073705/Martin+Kadiev+Dissertation.pdf> Erişim Tarihi: 07.03.2021.



GAZİ GELECEKTİR..