

**ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ DESTEKLİ KIZILÖTESİ  
GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ TASARIMI**

**DESIGN OF INERTIAL MEASUREMENT UNIT AIDED  
INFRARED IMAGING SYSTEM**

**TUGAY DÖNER**

**Dr. Öğr. Üyesi Dinçer GÖKCEN  
Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim–Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

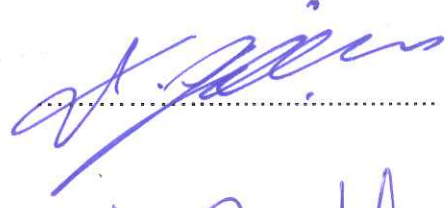
2019

Tugay DÖNER' in hazırladığı “Ataletsel Ölçüm Birimi Destekli Kızılötesi Görüntüleme Sistemi Tasarımı” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

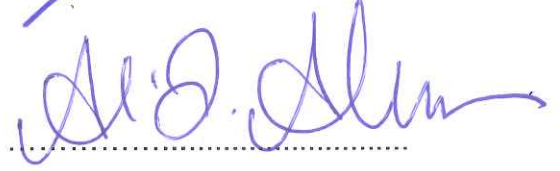
Prof. Dr. H. Selçuk GEÇİM  
Başkan



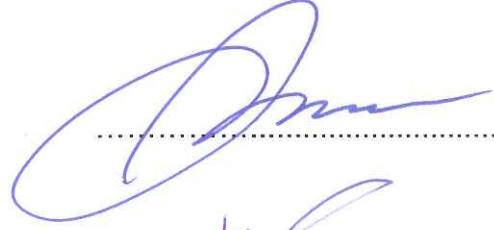
Dr. Öğr. Üyesi Dinçer GÖKCEN  
Danışman



Prof. Dr. Ali Ziya ALKAR  
Üye



Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL  
Üye



Dr. Öğr. Üyesi Seniha Esen YÜKSEL  
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak ..... / .... /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*Kıymetli Annem, Babam ve Kardeşlerime...*

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

29 / 01 / 2019



TUGAY DÖNER

## YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan *“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”* kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren .... ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

29 / 01 / 2019



TUGAY DÖNER

## ÖZET

# ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ DESTEKLİ KIZILÖTESİ GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ TASARIMI

**Tugay DÖNER**

**Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Dinçer GÖKCEN**

**Ocak 2019, 108 sayfa**

Kızılötesi (KÖ) görüntüleme sistemleri sivil ve askeri görüntüleme uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesindeki dalgalarda yapılan elektromanyetik yayılımları algılamak üzere odaksal düzlem dizisi (*İng.* focal plane array) şeklindeki kızılötesi görüntü algılayıcıları (*İng.* image sensors) kullanılmaktadır. Çeşitli optik elemanlar aracılığıyla odaklanan ve odaksal düzlem dizisi üzerine düşürülmesi sağlanan kızılötesi ışınım belirli bir pozlama süresi (*İng.* integration time) boyunca algılayıcı tarafından emilir ve daha sonra okuma devreleri aracılığıyla analog elektriksel sinyal olarak okunur. Elde edilen KÖ görüntünün bulanık olmaması için gerekli şartlardan biri pozlama süresi boyunca görüntülenen nesne ile görüntü algılayıcısının birbirlerine göre bağlı hareketlerinin sıfır olması veya kabul edilebilir bir sınırın içinde kalması gerekliliğidir. Görüntülenen nesnenin ya da görüntüleme sisteminin pozlama süresi boyunca yaptığı hareket KÖ görüntü de bulanıklığa neden olacaktır. Bu tez çalışması kapsamında, KÖ görüntüleme sistemi hareketinden kaynaklı ortaya çıkan bulanıklık incelenmiş ve modellenmiştir. Bulanıklığın nicel olarak hesaplanabilmesi için KÖ görüntüleme sistemi hareketini ölçmek amacıyla ataletsel ölçüm birimi (*İng.* inertial measurement unit) verisi kullanılmıştır. Böylece pozlama süresi boyunca KÖ görüntüleme sistemine ait Ataletsel Ölçüm Birimi (AÖB) verisi kullanılarak her bir

piksele ait nokta yayılım fonksiyonunu (*İng.* point spread function) hesaplayan yazılım geliştirilmiştir. KÖ görüntüleme sistemi hareketinden kaynaklı bulanıklık hesaplandıktan sonra, oluşan bulanıklık görüntü işleme teknikleri kullanılarak yok edilmeye çalışılmıştır. Bulanıklığı gidermek üzere literatürde kullanılan görüntü işleme teknikleri incelenmiş ve başarımlarını test etmek amacıyla MATLAB ortamında benzetimler yapılmıştır. MATLAB ortamında test edilen bulanıklık giderici algoritmaların gerçek zamanlı olarak FPGA üzerinde uygulanabilirliği araştırılmış ve bunun için gerekli donanım ve yazılım kaynakları belirlenmeye çalışılmıştır. Seçilen bir bulanıklık giderici algoritmanın gerçek zamanlı tasarımı birebir FPGA IP çekirdekleri kullanılarak Xilinx System Generator ortamında yapılmıştır. Gerçek zamanlı görüntü netleştirme biriminde hafıza olarak SDRAM kullanımı durumunda, 2B-FFT uygulanmasında kullanılacak devrik alma işleminden dolayı ortaya çıkacak sorunlar incelenmiştir. Bu hafıza kullanılarak bir görüntünün devriğinin (*İng.* transpose) alınmasının tüm gerçek zamanlı görüntü işleme akışını yavaşlatacak düzeyde uzun olacağı anlaşılmıştır. Görüntünün daha hızlı devriğinin alınması ve hafızayı daha verimli kullanmak üzere Corner Turn Matris isimli yöntem incelenmiştir. Corner Turn Matris yöntemiyle daha hızlı devrik alınması işlemi System Generator ortamında tasarlanmıştır. System Generator ortamında tasarlanan bulanıklık giderici algoritmaya ait benzetimler yapılmış ve sonuçlar MATLAB sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bulanıklık giderici algoritmanın bazı kritik alt IP çekirdekleri Xilinx Zynq SoC (*İng.* system-on-chip) taşıyan geliştirme kartı kullanılarak gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Gerçek zamanlı olarak uygulanmayan diğer bulanıklık giderici algoritmaların MATLAB benzetimleri yapılmıştır. Tez çalışması sonucunda, KÖ görüntüleme sisteminin pozlama süresi boyunca bir senaryo dahilinde yaptığı hareketin oluşturduğu bulanıklık nicel olarak hesaplanabilmektedir. Ardından bu bulanıklık belirli şartları sağlıyorsa System Generator ortamında tasarlanan bulanıklık giderici algoritma kullanılarak yok edilebilmektedir. Bazı tipteki bulanıklıklar için System Generator uygulamasının başarımları düşük kalabilmektedir. Bu tip bulanıklıklar MATLAB ortamında uygulanan tekrarlayan en küçük kareler (*İng.* iterative least squares) yöntemi tabanlı bulanıklık giderici algoritma kullanılarak yok edilebilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kızılötesi Görüntüleme, Bulanıklık, AÖB, FPGA, Nokta Yayılım Fonksiyonu, Dekonvolüsyon

## **ABSTRACT**

# **DESIGN OF INERTIAL MEASUREMENT UNIT AIDED INFRARED IMAGING SYSTEM**

**Tugay DÖNER**

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics  
Engineering**

**Supervisor: Dr. Dinçer GÖKCEN**

**January 2019, 108 pages**

Infrared (IR) imaging systems are frequently used in civil and military imaging applications. Infrared image sensors are used in the focal plane array to detect electromagnetic emissions in the wavelengths of the infrared region of the electromagnetic spectrum. Infrared radiation, which is focused through various optical elements and fallen onto the focal plane array, is absorbed by the infrared sensor during a certain exposure time, and is then read as an analog electrical signal by using the readout circuits. One of the conditions required for the IR image to not be blurred is that the relative motion between the imaged object and IR imaging system must be zero or remain within an acceptable limit, during the integration time. The motion of the imaged object or the IR imaging system during the integration time will cause blurring of the IR image. Within the scope of this thesis, the blur caused by the IR imaging system movement has been examined and modeled. In order to quantify the blur, an inertial measurement unit is used to measure the movement of the IR imaging system. Thus the software for calculating PSF for each pixel was developed using the IMU data of the movement of IR imaging system during the integration time. After calculating the blur due to the IR imaging system movement, the resulting blur is tried to be eliminated by using image



processing techniques. In order to eliminate the blur, image processing techniques used in the literature were examined and simulations were made about their performance. In order to get the applicability of the obtained deblurring algorithms on FPGA in real time, the necessary hardware and software resource were tried to be determined. Deblurring algorithm was implemented in the Xilinx System Generator environment using FPGA IP cores for real-time working on FPGA. In case of use of SDRAM as a memory in real-time image deblurring, the problems that will arise due to matrix transposition to be used in 2D-FFT application are examined. Using this memory, it was found that image transpose would be long enough to slow down the entire real-time image processing flow. The Corner Turn Matrix method is designed in the System Generator environment for faster transpose of the image and more efficient use of SDRAM memory. Deblurring algorithm designed in System Generator environment is simulated and the results are compared with MATLAB results. Some critical sub-IP cores of the deblurring algorithm have been tested in real time using the development board that carries the Xilinx Zynq SoC (System-on-chip). MATLAB simulations were performed for other deblurring algorithms which were not applied in real time. As a result of the thesis study, the blur caused by the movement of the IR imaging system in a scenario during the integration time can be calculated quantitatively. Then this blur can be eliminated by using the deblurring algorithm designed in the System Generator environment if it meets certain requirements. For some types of blur, the performance of the System Generator application may remain low. For these types of blur, images can be clarified by using the algorithm based on the iterative least squares method designed in MATLAB.

**Keywords:** Infrared Imaging, Blur, IMU, FPGA, Point Spread Function, Deconvolution

## TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşturulmasının her aşamasında tecrübe ve derin bilgi birikimiyle beni destekleyen ve değerli teşvik, yönlendirme ile eleştirel katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın. Dr. Öğr. Üyesi Dinçer GÖKCEN' e yürekten teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmamla ilgili önemli katkılarından dolayı mesai arkadaşlarım Ali Can ARIK ve Ahmet ÇAKIROĞLU' na çok teşekkür ederim.

Kızılötesi kamera görüntülerini temin etmemde yardımcı olan TÜBİTAK SAGE Optik Tasarım Birim Amiri Sn. Dr. Bülent ÖZKAN ile değerli çalışma arkadaşlarım Gökтуğ Gencehan ARTAN ve Hasan DOĞAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Gerçek zamanlı görüntü işleme testlerinde kullandığım donanımları sağlayan ve gerçek zamanlı görüntü işleme konusunda derin bilgi birikimiyle beni sürekli destekleyen katkılar sunan TÜBİTAK SAGE Sayısal Elektronik Tasarım Birim Amiri Sn. Osman Volkan KARACA' ya içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca titiz akademik bakış açısı ve yenilikçi mühendislik yaklaşımlarıyla tecrübelerinden faydalandığım TÜBİTAK SAGE Elektronik Sistemler Grubu Koordinatörü Sn. Dr. Salih ZENGİN' e teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, yoğun tez çalışması döneminde desteklerini üzerimden hiç esirgemeyen babam Oktay DÖNER ve annem Muazzez DÖNER ile canım kardeşlerim Cansu ve Muhammed Can' a çok teşekkür ediyorum.

# İÇİNDEKİLER TABLOSU

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER TABLOSU .....	vi
ŞEKİLLER .....	viii
ÇİZELGELER .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Kızılötesi Görüntüleme ve Tarihsel Gelişimi .....	1
1.2. Problemin Tanımı .....	3
1.3. Tezin Amacı .....	4
1.4. Tezin Akışı .....	4
1.5. Tezin Kapsamı .....	5
2. KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER VE GÖRÜNTÜLEME İLKELERİ .....	6
2.1. Kızılötesi Dedektörlerin Sınıflandırılması .....	6
2.1.1. Kızılötesi Foton Dedektörleri .....	7
2.2. Kızılötesi Görüntü Alma Süreci .....	12
2.2.1. Atmosferik Geçirgenlik .....	14
2.2.2. Kızılötesi Foton Dedektörlerinde Görüntü Alma Süreci .....	17
3. BULANIKLAŞMA MODELLERİ .....	23
3.1. Uzamsal–Değişmeyen Bulanıklık .....	24
3.2. Uzamsal–Değişen Bulanıklık .....	26
3.2.1. Homografi .....	31
3.2.2. KÖ Dedektör Hareketi .....	32
3.2.3. Bulanıklık Modeli .....	35

4. GÖRÜNTÜ NETLEŞTİRME.....	46
4.1. Uzamsal-Değişmeyen Bulanıklığın Yok Edilmesi.....	47
4.1.1. Ters Filtreleme.....	48
4.1.2. Wiener Filtreleme.....	49
4.1.3. Richardson–Lucy Yöntemi.....	49
4.1.4. Tekrarlayan En Küçük Kareler Yöntemi.....	51
4.1.5. Eniyilime Yöntemleri ( <i>Ing.</i> Optimization).....	52
4.1.6. Varyasyonel Bayes Yöntemi.....	53
4.2. Uzamsal-Değişen Bulanıklığın Yok Edilmesi.....	54
4.2.1. Benzerlik Fonksiyonun En Yüksek Yapılması.....	54
4.2.2. Richardson–Lucy Yöntemi.....	56
4.2.3. Tekrarlayan En Küçük Kareler Yöntemi.....	57
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	59
5.1. Uzamsal-Değişmeyen Bulanıklık için Deneysel Çalışmalar.....	60
5.1.1. Ters Filtreleme.....	60
5.1.2. Wiener Filtreleme.....	63
5.1.2.1. MATLAB Benzetimi.....	63
5.1.2.2. FPGA Tasarımı.....	68
5.2. Uzamsal-Değişen Bulanıklık için Deneysel Çalışmalar.....	97
5.2.1.1. MATLAB Benzetimi.....	97
6. SONUÇLAR.....	100
7. KAYNAKLAR.....	103

## ŞEKİLLER

Şekil 1.1–KÖ Dedektör ve Okuma Devresinin Hibrit Tümlleştirilmesi ( [1]'den uyarlanmıştır) .....	3
Şekil 2.1–Kızılötesi Dedektör Sınıflandırması.....	6
Şekil 2.2–Fotoiletken Dedektör Eşdeğer Devresi .....	8
Şekil 2.3–Yarıiletken Kuşak Yapısı.....	8
Şekil 2.4–Yarıiletken Kuşak Yapısında KÖ Yayılım Kaynaklı Uyarım .....	9
Şekil 2.5–Ters Kutuplanmış PN Eklemi ve Eklem Üzerine Düşen KÖ Yayılım [13] .....	10
Şekil 2.6–Odaksal Düzlem Dizisi Yapısındaki KÖ Dedektör .....	11
Şekil 2.7–Elektromanyetik Spektrum.....	12
Şekil 2.8–Görünür Bölgede Görüntü Elde Edilmesi.....	13
Şekil 2.9–Kızılötesi Bölgede Görüntü Elde Edilmesi .....	13
Şekil 2.10–Aynı Nesnenin Görünür Bölge ve Kızılötesi Bölge Görüntüsü [16] .....	14
Şekil 2.11–Elektromanyetik Yayılımlar için Kirchhoff Yasası [13].....	15
Şekil 2.12–Kızılötesi Bölgede Atmosferik Geçirgenlik ( [18]' den uyarlanmıştır.) .	15
Şekil 2.13–Üzerine KÖ Yayılım Düşürülmüş Fotodiyot Eşdeğer Devresi .....	17
Şekil 2.14–KÖ Dedektör Hareketinden Kaynaklı Bulanıklık Oluşmaması İçin Eniyi Durum .....	18
Şekil 2.15–KÖ Dedektör Hareketinden Kaynaklı Bulanıklık Oluşması Durumu....	19
Şekil 2.16–Soğutuculu ODKÖ Dedektör Bütünü ( [23]'den uyarlanmıştır).....	19
Şekil 2.17–KÖ Dedektörün Pozlama Süresi Boyunca Hareket Etmesi.....	20
Şekil 3.1–Düzgün Dağılan Bulanıklık Modeli (Görüntü: [34]).....	25
Şekil 3.2–İğne Deliği (İng. pin hole) Kamera Görüntüleme Sistemi Modeli .....	27
Şekil 3.3–KÖ ODD Üzerindeki Bir Piksel Bölgesi.....	28
Şekil 3.4–3B Noktanın Kamera Optiğinden Geçerek Görüntü Sensörü Düzlemine Düşürülmesindeki Dönüşümler.....	29
Şekil 3.5–Homografi dönüşümü ( [37]' dan uyarlanmıştır).....	31
Şekil 3.6–KÖ Dedektörün Çizgisel ve Dönme (Rotasyon) Hareketlerinin Bulanıklığa Etkisi ( [38]' den uyarlanmıştır) .....	33
Şekil 3.7–KÖ Dedektör Euler Açısı Eksenleri.....	37
Şekil 3.8–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu-0 .....	39

Şekil 3.9-Pozlama Süresi Boyunca KÖ Dedektörün Dönme Hareketinden Homografinin Hesaplanması .....	40
Şekil 3.10–Pozlama Süresi Boyunca Bazı Anlardaki KÖ Dedektör Pozları .....	40
Şekil 3.11–Pozlama Süresi Boyunca Bazı Poz Anlarında Alınan Ara Görüntüler ve Gözlenen Son Görüntü.....	41
Şekil 3.12–Hareket Senaryosu–0 İçin Bazı Piksellere Ait Nokta Yayılım Fonksiyonları .....	41
Şekil 3.13–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu–1 .....	42
Şekil 3.14–Hareket Senaryosu–1 İçin Bazı Piksellerin Nokta Yayılım Fonksiyonları .....	42
Şekil 3.15–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu–2 .....	43
Şekil 3.16–Hareket Senaryosu–2 İçin Bazı Piksellerin Nokta Yayılım Fonksiyonları .....	43
Şekil 3.17–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu–3 .....	44
Şekil 3.18–Hareket Senaryosu–3 İçin Bazı Piksellerin Nokta Yayılım Fonksiyonları .....	44
Şekil 3.19–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu–4 .....	45
Şekil 3.20–Hareket Senaryosu–4 İçin Bazı Piksellerin Nokta Yayılım Fonksiyonları .....	45
Şekil 4.1–Bulanıklığın Doğrusal Sistem Olarak Modellenmesi ( [42]).....	47
Şekil 5.1–MATLAB Ters Filtreleme Sonucu .....	61
Şekil 5.2–Küçük Değerli Bulanıklaşma Filtresi Durumunda Gürültünün Baskın Hale Gelmesi .....	62
Şekil 5.3–Wiener Filtreleme Test Şeması .....	63
Şekil 5.4–MATLAB Wiener Filtreleme Sonuçları .....	64
Şekil 5.5–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu-2 .....	65
Şekil 5.6–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu–2 için NYF .....	66
Şekil 5.7–Wiener Filtreleme MATLAB Benzetimi–1(Hacettepe).....	66
Şekil 5.8–Wiener Filtreleme MATLAB Benzetimi–2 (jets).....	67
Şekil 5.9–DSP ve FPGA Mimarilerinde FIR Filtre Uygulanması ( [59]’ den uyarlanmıştır) .....	70
Şekil 5.10–FFT Algoritmasının 800MHz ARM Cortex A9 İşlemci ve FPGA ‘de Uygulanma Durumlarında İşlem Süreleri ( [60]’ den uyarlanmıştır) .....	72
Şekil 5.11–Xilinx ZYNQ SoC Tümüleşik Devresi Blok Diyagramı ( [61] ) .....	73

Şekil 5.12–AÖB Verisi Yardımıyla Görüntü Bulanıklığının Giderilmesi Algoritması Donanım–Yazılım Görev Paylaşım Şeması .....	74
Şekil 5.13–SRAM Yapısı ( [62]’ dan uyarlanmıştır) .....	76
Şekil 5.14–SDRAM Yapısı.....	76
Şekil 5.15–Xilinx 1B-FFT IP Çekirdeği Başarım Testi için System Generator Tasarımı ( [63]’ dan uyarlanmıştır) .....	77
Şekil 5.16–Xilinx 1B-FFT System Generator Tasarımı, IP ‘nin Bit-Doğruluk C Modeli ve MATLAB “ <i>fft</i> ” fonksiyonu Karşılaştırılması .....	80
Şekil 5.17–Xilinx ZC702 Geliştirme Kartı ( [70]) .....	80
Şekil 5.18–1B-FFT’ nin Gerçek Zamanlı Hesaplanması için Zynq 7000 SoC Tasarımı Blok Diyagramı .....	81
Şekil 5.19–Gerçek zamanlı olarak 1B FFT IP Çekirdeğinin Performans Testlerinde Kullanılan Xilinx ZYNQ SoC FPGA Tasarımı Blok Şeması ([65]).....	83
Şekil 5.20–2 kez 1B-FFT Kullanarak 2B-FFT Elde Edilmesi .....	84
Şekil 5.21–Corner Turn Matris Yöntemiyle Devrik Alınarak 2B-FFT Elde Edilmesi .....	85
Şekil 5.22-2B–FFT System Generator Tasarımı: İki tane 1B–FFT işlemi ve Corner Turn Matris Yöntemiyle Devrik Alınması için System Generator Tasarımı .....	88
Şekil 5.23–Corner Turn Matris Yöntemiyle Devrik Alınması System Generator Tasarımı: Adres Üretici Bloğu.....	89
Şekil 5.24–Corner Turn Matris Yöntemiyle Devrik Alınması System Generator Tasarımı: “Ping-Pong” Tampon Bellek Bloğu Tasarımı .....	90
Şekil 5.25–Uzamsal Değişmeyen Bulanıklığın System Generator Tasarımı .....	91
Şekil 5.26–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: Detaylı Algoritma Akış Şeması .....	92
Şekil 5.27–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: Birinci Aşama Bulanık Görüntü ile Bulanıklaşma Filtresine 2B–FFT İşleminin Uygulanması .....	93
Şekil 5.28–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: İkinci Aşama Görüntü 2B–FFT ve Bulanıklaşma Filtresi 2B–FFT Sonuçlarının Karmaşık Çarpım İşlemine Tabi Tutulması.....	94
Şekil 5.29–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: Üçüncü Aşama Karmaşık Çarpım Sonucuna 2B–Ters FFT (İng. Inverse FFT) İşleminin Uygulanması .....	95

Şekil 5.30–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: Sonuçlar-1 (Hacettepe)	96
.....	96
Şekil 5.31–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: Sonuçlar-2 (jets) .....	96
Şekil 5.32–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu-1 .....	98
Şekil 5.33-L-BFGS-B Yöntemi Kullanılarak MATLAB Görüntü Netleştirme Sonucu-1 .....	98
Şekil 5.34–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu-2 .....	99
Şekil 5.35-L-BFGS-B Yöntemi Kullanılarak MATLAB Görüntü Netleştirme Sonucu-2 .....	99



## ÇİZELGELER

Tablo 2.1–KÖ Dedektör Çeşitlerine göre ölçülebilir çıkış özelliği ( [11]’ den uyarlanmıştır) .....	7
Tablo 2.2–KÖ Dedektör Üretiminde Kullanılan Bazı Malzemeler için Kesilim Dalgaboyu ( [14]’ den uyarlanmıştır) .....	11
Tablo 2.3–Kızılötesi Bölgelerin Sınıflandırılması ( [12]).....	16
Tablo 3.1–İç Parametrelerin Hesabında Kullanılan Terimler ve Açıklamaları.....	28
Tablo 5.1–Farklı Uzunluktaki Sayısal Sinyallerin FFT ve Doğrudan Doğrusal Evrişim ile Filtreleme İşlemlerinde Yapılacak Çarpma/Toplama İşlemi Sayıları .....	69
Tablo 5.2–FFT IP Çekirdeği Ayarlanan Parametreler.....	77
Tablo 5.3–Testte Kullanılan Girdi Sayılarının Özellikleri.....	78
Tablo 5.4–Xilinx 1B-FFT System Generator Tasarımı, IP ‘nin Bit-Doğruluk C Modeli ve MATLAB “fft” Fonksiyonu FFT Sonuçları .....	79
Tablo 5.5–Matris Devrik Alma İşleminde Farklı Yöntemler için Geçen Süreleri ( [66]) .....	86
Tablo 6.1–2B-FFT System Generator Tasarımı FPGA Kaynak Tüketimi .....	102

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\lambda$	Dalgaboyu
$E_g$	Kuşaklararası enerji farkı
$h$	Planck sabiti
$c$	Işık hızı
$f$	Frekans
$C$	KÖ dedektör iç matrisi
$R_t$	KÖ dedektör dönme matrisi
$T_t$	KÖ dedektör doğrusal hareket matrisi
$H_t$	KÖ dedektör homografi matrisi
,	Ondalıklı sayıları ifade etmede virgül kullanılmıştır

### Kısaltmalar

IR	Infrared	Kızılötesi (KÖ)
IMU	Inertial Measurement Unit	Ataletsel Ölçüm Birimi (AÖB)
PSF	Point Spread Function	Nokta Yayılım Fonksiyonu (NYF)
RGB	Red Green Blue	Kırmızı Yeşil Mavi
CPU	Central Processing Unit	Merkezi İşlem Birimi
ODD	Focal Plane Array	Odaksal Düzlem Dizisi (ODD)
FPGA	Field Programmable Gate Array	Alan Programlanabilir Kapı Dizileri
GPU	Graphical Processing Unit	Grafik İşlemci Birimi
SRAM	Static Random Access Memory	Durağan Rastgele Erişimli Bellek
FFT	Fast Fourier Transform	Hızlı Fourier Dönüşümü
SWIR	Short Wave Infrared	Kısa Dalgaboyu Kızılötesi (KDKÖ)

MWIR	Mid Wave Infrared	Orta Dalgaboyu Kızılötesi (ODKÖ)
LWIR	Long Wave Infrared	Uzun Dalgaboyu Kızılötesi (UDKÖ)
3D	Three-Dimension	Üç Boyut (3B)

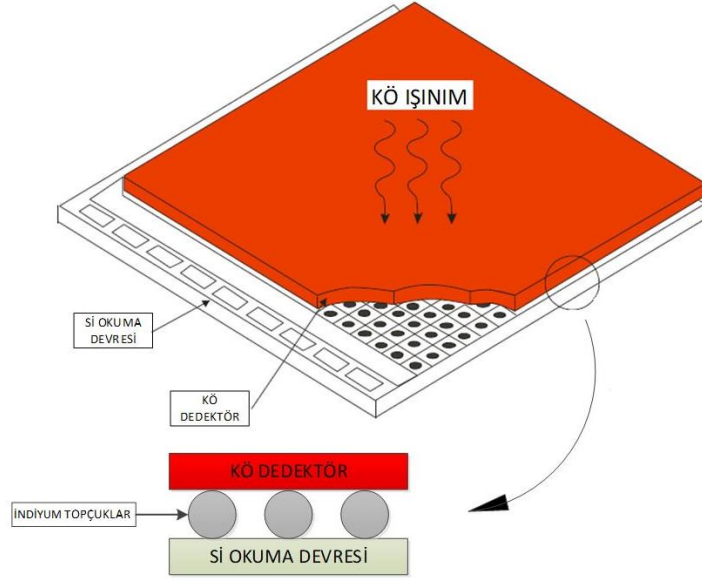
# 1. GİRİŞ

## 1.1. Kızılötesi Görüntüleme ve Tarihsel Gelişimi

Elektromanyetik spektrumda 0,75 ila 1000 mikrometre dalga boylarındaki yayılımlar, görünür bölgedeki kırmızı rengin ötesinde anlamına gelen kızılötesi (*İng.* infrared) bölge olarak tanımlanır. 0,4 ila 0,75 mikrometre dalga boyu aralığındaki yayılımların gerçekleşmesi için güneş gibi bir ışık kaynağına ihtiyaç vardır. Karanlık ortamlarda ya da geceleri bir ışık kaynağı olmadığı için gerek insan gözü gerek ışığa duyarlı kamera sistemleriyle görüntüleme mümkün değildir. Bu nedenle kızılötesi bölge yayılımlarını algılayan görüntü algılayıcıları kullanılmaktadır. Kızılötesi enerjiyi (ısı) algılayan ve anlamlandırılabilir sinyallere dönüştüren sistemlere kızılötesi kamera denir. Günümüzde kızılötesi görüntüleme sistemleri askeri gözetleme ile hedef tespit, takip, tanıma uygulamalarında eskiden beri kullanılır. KÖ görüntüleme sistemleri gece-görüş sistemleriyle kullanılmaya başlansa da bugün sivil tüketici elektroniğinden askeri elektroniğe kadar çok yaygın ve farklı kullanım alanlarına sahiptir. Sivil uygulamalarda özellikle arızaların tespitinde kullanılmaktadır. Tarım, veterinerlik, tıp, yangınla mücadele ve arama-kurtarma yaygın kullanım alanlarından bazılarıdır.

Kızılötesi fiziği ve görüntüleme teknolojilerinin gelişiminde önemli kilometre taşlarını tarihsel bir bakış açısı içinde değerlendiren güncel bir çalışma Rogalski tarafından sunulmuştur [1]. Kızılötesi sistemlerin tarihsel gelişimi incelendiğinde, Almanya doğumlu, İngiliz astronom ve teleskop üreticisi Frederick William Herschel (1738–1822)'in termometre ve prizma ile güneş ışığı içindeki renklerin sıcaklığını ölçme deneyine kadar kızılötesi (KÖ) ışınımın bilinmediği düşünülmektedir. Güneş ışığını, prizma içinden geçirerek gökkuşağındaki renklere ayrılmasını sağlayan Herschel, her bir rengin sıcaklığını termometre ile ölçmüştür. Termometreden okunan sıcaklığın mor ışıktan kırmızı ışığa doğru arttığını gözlemlemiştir. Herschel kırmızı ışığın bittiği yerin hemen ötesindeki noktanın da sıcaklığını ölçmüştür ve bu noktanın sıcaklığının renkler içindeki en yüksek sıcaklığa sahip nokta olduğunu görmüştür. Bu noktada Herschel kırmızı ışığın ötesinde gözle görülmeyen bir yayılımın olduğunu anlamıştır. Bu nedenle bu yayılıma Kızılötesi (*İng.* infrared, -infra öneki Latince 'altında' anlamındadır) yayılım adı verilmiştir.

Kızılötesi görüntüleme sistemleriyle ilgili kritik ilerlemeler İkinci Dünya Savaşı yıllarında gerçekleşmiştir. Savaş sonrasında KÖ teknolojisi iletişim, hedef tespiti ve takibi amaçlarıyla silah sistemlerinde yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Uçak gövde ve motorlarının yüksek miktarda ısı yayması, KÖ dedektör ile tespit edilebilmelerini sağlamaktadır. Bu nedenle 1950'lerin ortalarında AIM-9 serisi havadan havaya güdümlü füze (*İng.* air-to-air guided missile) ailesinin ilk varyantları kurşun sülfür malzemesinden tek piksel KÖ arayıcıyla ortaya çıkmaya başlamıştır [2]. Bundan sonraki KÖ dedektör teknolojisindeki gelişmelere uygun şekilde, düşük sıcaklığın dedektör malzemesinin kendi ürettiği gürültüyü azalttığına anlaşılması üzerine, AIM-9D varyantından itibaren arayıcı başlıklarda (*İng.* seeker) soğutuculu KÖ dedektörler kullanılmıştır. 1957 yılında İngiltere'de, MCT (HgCdTe) olarak isimlendirilen üçlü alaşımın, kullanılan elementlerin miktarlarına göre iletim ve değerlik bantları arasındaki enerji farkının ayarlanabilir olması ile farklı KÖ dalgaboylarını algılayabilen bir malzeme olduğu anlaşılmıştır [3]. MCT (**M**ercury, **C**admiunum, **T**ellur) bugün tüm dünyada en yaygın kullanıma sahip KÖ algılayıcı malzemelerinden biridir. Soğuk savaş döneminde özellikle yarıiletken teknolojisindeki gelişmelerle eşgüdümlü olarak KÖ dedektör teknolojisinde de kısa zamanda çok önemli ilerlemeler elde edilmiştir. 1970'li yıllara gelindiğinde ise tek-piksel elemanlı dedektörler yerine, üzerinde birden fazla piksel elemanını barındıran ve odaksal düzlem dizini (*İng.* focal plane array) olarak isimlendirilen KÖ sensör yapıları kullanılmaya başlanmıştır [4]. Birden fazla pikselden oluşan bir boyutlu tek satırlık KÖ ODD üretildiği gibi, sonrasında iki boyutlu KÖ ODD de üretilmiştir [5]. İki boyutlu KÖ ODD' nin piksel bölgelerine düşen KÖ yayılımların emildiği süre olan pozlama süresinin (*İng.* integration time) ayarlanabilmesi, KÖ ODD' den piksel değerlerinin seçilerek sırayla okunması, okunan değerlerin yükseltilmesi ve belirli bir saat sinyaline eşgüdümlü şekilde kullanıcıya sunulması işlerini yapmak üzere KÖ okuma devreleri (*İng.* read-out integrated circuit) geliştirilmiştir. KÖ ODD' ler, 0,75  $\mu m$  ile 1000  $\mu m$  aralığında belirli bir bölgedeki KÖ yayılımları algılayabilecek aktif malzemedan üretilmiş KÖ dedektör (*İng.* IR detector) ile silisyum tabanlı okuma devresinin hibrit tümleştirme (*İng.* flip chip bonding) yapılmasıyla elde edilir. Böylece KÖ ODD' leri hibrit tümleştirme işlemiyle Şekil 1.1 ile verildiği gibi tek bir tümdevre paketi haline getirilerek üretilebilmektedir.



Şekil 1.1–KÖ Dedektör ve Okuma Devresinin Hibrit Tümlleştirilmesi ( [1]'den uyarlanmıştır)

## 1.2. Problemin Tanımı

Kızılötesi görüntü yakalama işlemi sırasında pozlama süresi boyunca, kameranın izin verilen sınırlar dışındaki hareketi neticesinde, elde edilen kızılötesi görüntüler bulanık olmaktadır [6]. Pozlama süresindeki artış, dedektörde toplanan foton sayısını artırmaktadır. Özellikle hareketli sistemlerin görüntülenmesi amacıyla genellikle kısa pozlama süreleri kullanan kameralar tercih edilmektedir. Ancak pozlama süresinin düşmesinin dahi bazı durumlarda görüntünün bulanıklaşmasına engel olamadığı gibi, görüntü kalitesinin artırılması için pozlama süresinin yüksek tutulması da tercih edilir [7] [8]. Özellikle hava araçlarında güdüm, kontrol ve görsel seyrüsefer gibi gerçek zamanlı çalışan algoritmalara girdi olarak kullanılan KÖ görüntülerin azami düzeyde hatasız olması ve bulanıklık içermemeleri istenmektedir. Girdi olarak bozuk ve bulanık görüntüler kullanılması durumunda bu algoritmaların başarımları oldukça düşer. Bu tez çalışmasında, kamera hareketinden dolayı bulanıklaşan görüntüler için bir bulanıklaşma modeli benimsenecektir. Buna göre pozlama süresi boyunca kamera hareketinin bulanıklaşma üzerindeki etkisi matematiksel bağıntılar ile açıklanacak ve gerçek zamanlı görüntü işleme algoritmalarıyla bulanık görüntü netleştirilmeye çalışılacaktır.

### **1.3. Tezin Amacı**

Pozlama süresi (foton toplama süresi) boyunca KÖ görüntüleme sisteminin yaptığı hareketten kaynaklı olarak ortaya çıkan görüntüdeki bulanıklık miktarının AÖB verisi kullanılarak tespit edilmesi ve bu bulanıklığın gerçek zamanlı görüntü işleme teknikleri ile yok edilebilirliğinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

### **1.4. Tezin Akışı**

Bu tez çalışması 5 ana bölümden oluşur. Birinci bölüm giriş bölümüdür. Giriş bölümünde tez konusuna giriş yapılarak okuyucunun problemi anlayabilmesi için gerekli ön bilgiler giriş düzeyinde sunulmuştur. Problemin tanımı, tezin amacı ve kapsamı verilmiştir. İkinci bölüm kızılötesi görüntüleme ilkelerinin ve KÖ dedektörlerin anlatıldığı bölümdür. Bu bölümde KÖ dedektörden görüntü alınması süreci açıklanacak ve KÖ dedektör hareketinin görüntü alma sürecinde hangi aşamada görüntüde bulanıklaşmaya neden olduğu anlatılacaktır. Üçüncü bölüm bulanıklığın modellendiği bölümdür. Bu bölümde problemle ilgili daha önce yapılan çalışmalara yer verilmiş ve literatürde yaygın olarak kullanılan bulanıklaşma modelleri incelenmiştir ve bu tez çalışmasında hangi bulanıklaşma modelinin benimsendiği ifade edilmiştir. Ayrıca KÖ kamera hareketi kaynaklı bulanıklık, kamera hareketi kullanılarak hesaplanacaktır. Böylece görüntünün, KÖ kamera hareketinden kaynaklı olarak içerdiği bulanıklık miktarı görüntüleme sistemi modeli kullanılarak nicelik olarak hesaplanabilecektir. Bu bölümde ayrıca bulanıklaşma filtresi ya da fonksiyonu hesaplanır. Dördüncü bölümde kamera hareketi kaynaklı bulanık görüntünün netleştirilmesiyle ilgili mevcut çözümler sunulmuş ve kolaylık / zorlukları incelenmiştir. Beşinci bölümde ise tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ve benzetim sonuçlarına yer verilmiş ve elde edilen çıktılar son bölüm olan sonuçlar bölümünde değerlendirilmiştir.

## 1.5. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

- Benzer problemlerle ilgili daha önce yapılmış çalışmaların incelendiği literatür taraması,
- Benzer problemlerin çözümlerinde kullanılmış yöntemlerin MATLAB gibi benzetim araçlarıyla simülasyonlarının yapılması,
- Problemin çözümü için sunulan farklı yöntemleri kullanarak elde edilen benzetim sonuçlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi,
- Benzetim ortamında tasarlanan algoritmanın gerçek zamanlı uygulanması için gömülü işlemci ve/veya FPGA' e aktarılabilirliğinin incelenmesi,
- KÖ detektöre ait AÖB verisi kullanılarak NYF hesaplayan yazılımın geliştirilmesi,
- Gerçek zamanlı çalışma öncesinde Xilinx System Generator ortamında doğrudan FPGA IP çekirdeklerini kullanarak tasarım yapılması,
- System Generator tasarımı bazı alt bloklarının gerçek zamanlı olarak test edilmesi,
- System Generator tasarımı ile MATLAB tasarımı sonuçlarının karşılaştırılması,
- Deneysel çalışmalar kapsamında problemin ortaya çıktığı durumu elde etmek üzere test düzenekleri kurulması,
- Sonuçların değerlendirilmesi ve gelişime açık yanlarının ortaya çıkarılması

Bu tez çalışmasında aşağıdaki araştırma yöntemleri kullanılmıştır.

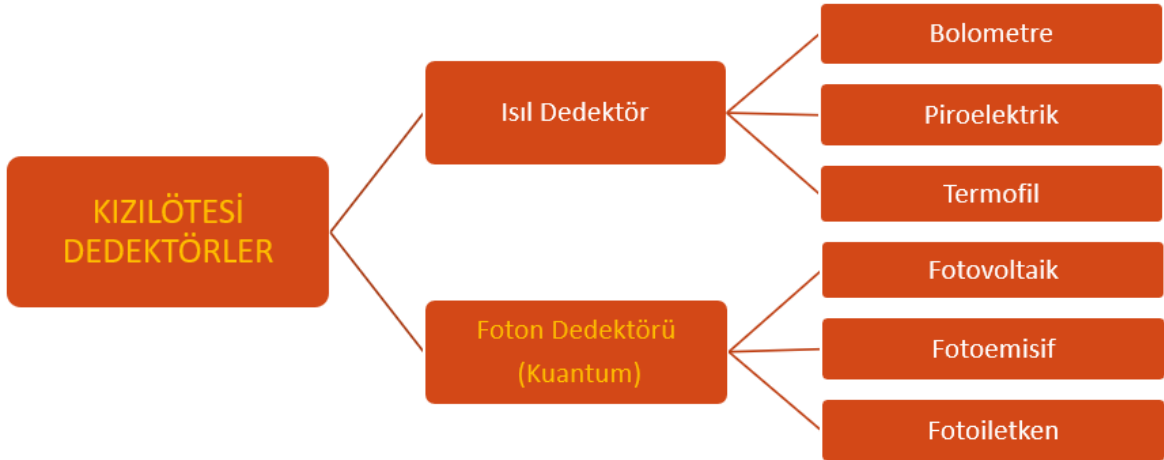
- Bilgisayarda benzetim araçlarıyla yapılan testler,
- Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen gerçek zamanlı uygulamalı testler,
- Bazı dekonvolüsyon testlerinde doğal görüntülerin gradyan dağılımlarına dair istatistiksel bilgiler kullanılmıştır.



## 2. KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER VE GÖRÜNTÜLEME İLKELERİ

### 2.1. Kızılötesi Dedektörlerin Sınıflandırılması

KÖ dedektörler Şekil 2.1 ile verildiği gibi iki temel gruba ayrılmaktadır. KÖ dedektörlerin ilk zamanlarda ısı dedektör olarak ortaya çıktığı önceki bölümde ifade edilmişti. Isıl dedektörlerin bir emici katmanı (*İng.* absorption layer) vardır ve bu yüzeye düşen ışınım yüzey tarafından emilerek ısıya dönüştürülür ve bu da yüzeyin sıcaklığının artmasına neden olur [9]. Yüzeye düşen ışınım miktarı, emici katmanın ısıttığı başka bir katmanın sıcaklığına bağlı olarak değişen ölçülebilir bir fiziksel özellik sayesinde çıkıştan okunabilmektedir. KÖ dedektörlerin bir alt-sınıfı olarak değerlendirilen ısı dedektörler (*İng.* Thermal dedector) bugün özellikle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıl dedektörlerin üretimleri diğer tip KÖ dedektörler olan foton(kuantum) dedektörlerine göre ucuz ve soğutma ihtiyaçları olmayıp oda sıcaklığında çalışabilmektedirler. Bununla birlikte algılayıcılıkları düşük ve tepki süreleri uzundur.



Şekil 2.1–Kızılötesi Dedektör Sınıflandırması

KÖ dedektörlerin diğer alt başlığı ise foton dedektörleridir (*İng.* Photon detector). Foton dedektörleri temel olarak, foton dedektörünün aktif algılayıcı malzemesi yüzeyine düşen toplam foton (*İng.* photon) miktarını ölçerler [10]. Foton dedektörü çıkışından okunan gerilim ya da akım, dedektör malzemesi tarafından emilen foton miktarıyla doğru orantılıdır. Foton dedektörlerinin algılayıcılıkları yüksek ve tepki süreleri kısadır. Bununla birlikte vakumlu soğutma (*İng.* cryogenic cooling) ihtiyaçları kullanımlarını hem zorlaştırmakta hem de pahalılaştırmaktadır.

Isıl ve foton tipteki KÖ dedektörlerin her bir alt çeşidi için dedektör üzerine düşen KÖ ışınımına bağlı olarak doğrudan veya dolaylı değişkenlik gösteren ve çıkıştan okunabilen ölçülebilir fiziksel özellik karşılarında Tablo 2.1 ile verilmiştir.

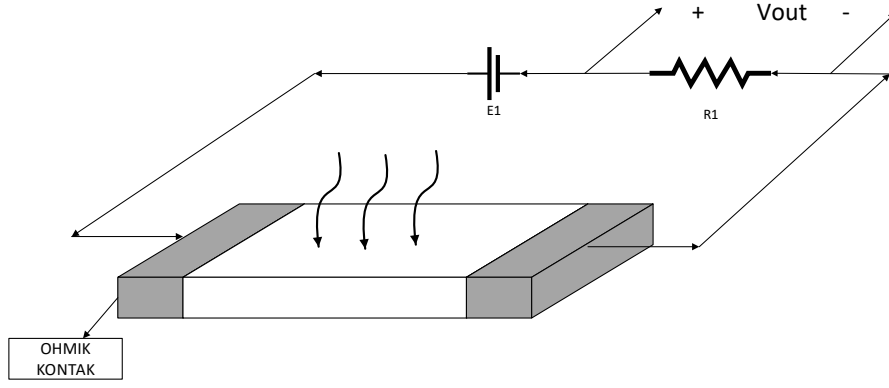
Tablo 2.1–KÖ Dedektör Çeşitlerine göre ölçülebilir çıkış özelliği ( [11]' den uyarlanmıştır)

KÖ Dedektör	Alt sınıf	Ölçülebilir çıkış özelliği
Isıl dedektör	Termofil	Gerilim
	Bolometre	Direnç
	Piroelektrik	Yük yerdeğiştirmesi
Foton (kuantum) dedektörü	Fotovoltaik	Gerilim
	Fotoiletken	Direnç
	Fotoemisif	Gerilim

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan görüntülerden bazıları fotovoltaik tipteki yüksek çözünürlüklü (640 x 512) ve sterling soğutmalı MWIR ve LWIR KÖ dedektörler ile alınmıştır. Bu yüzden foton dedektörleri daha detaylı incelenmiştir. Bir sonraki başlık olan Kızılötesi Foton Dedektörleri altında foton tipteki KÖ dedektörlerin çalışma prensipleri anlatılmıştır.

### 2.1.1. Kızılötesi Foton Dedektörleri

Çeşitli tipte KÖ foton dedektörleri geliştirilmiştir. Bunlardan ilki fotoiletken (*İng.* Photoconductive) KÖ dedektörlerdir. Bu tip dedektörler temel olarak KÖ yayılımına duyarlı dirençlerdir [12]. Özellikle Selenyumun (Se) fotoiletken özelliğinin anlaşılmasından sonra, foton dedektörleriyle ilgili çalışmalar başlamış ve ikinci dünya savaşı yıllarında bu tip dedektörlerle çalışmalarda önemli ilerlemeler elde edilmiştir. Fotoiletken dedektörlerde üzerine KÖ ışınım düştüğünde, malzemenin elektriksel direnci değişmektedir. Bu değişken direnç bir ön akım kullanılarak başka bir direnç üzerinden gerilim olarak okunabilmektedir. Böylece KÖ yayılımının seviyesi ölçülebilmektedir. Bir KÖ fotoiletken dedektörün çalışma prensibi Şekil 2.2 ile verilmiştir.



Şekil 2.2–Fotoiletken Dedektör Eşdeğer Devresi

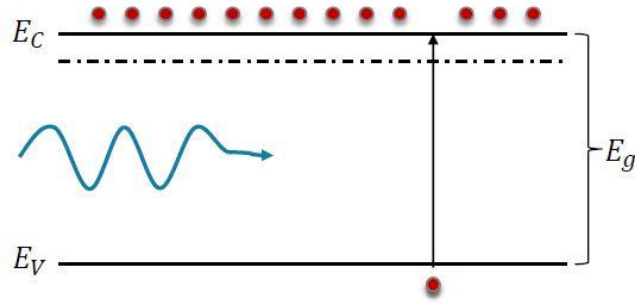
Foton dedektörlerindeki gelişmeler yarıiletken teknolojisinde ilerlemelere bağlı olarak hız kazanmıştır. Foton dedektörlerinin başka bir çeşidi de fotovoltatik dedektörlerdir. Fotovoltatik dedektörün en çok bilinen hali yarıiletkenler ile üretilen PN eklemidir. Çoğu zaman bu yapı fotodiyot olarak bilinir. Bu noktada yarıiletken teknoloji kullanılarak üretilen KÖ dedektörlerin nasıl çalıştığını anlamak üzere yarıiletken kuşak yapısının incelenmesi gerekmektedir. Yarıiletken kuşak yapısında, yarıiletken malzemenin elektron enerji seviyelerinin süreklilik göstermeyip, kesikli halde enerji kuşaklarından oluştuğu anlaşılmıştır. Bu durum Şekil 2.3 ile verilmiştir.



Şekil 2.3–Yarıiletken Kuşak Yapısı

İki temel kuşak vardır: iletim kuşağı ve değerlik kuşağı. Yalıtkanlarda bu iki kuşak arasındaki enerji farkı çok büyüktür. İletkenlerde ise bu iki kuşak birbirine geçmiş durumdadır. Yarıiletkenlerde bu iki kuşak birbirine yakındır. Şekil 2.4 ile gösterildiği

gibi ısı veya ışık esaslı uyarılarla değerlik kuşağından elektron koparılıp iletim kuşağında serbest hale getirilebilir ve böylece elektron akışı sağlanabilir.



Şekil 2.4–Yarıiletken Kuşak Yapısında KÖ Yayılım Kaynaklı Uyarım

Max Planck enerjinin foton denilen parçacıklar halinde bir noktadan başka bir noktaya iletiildiğini belirtmiştir. Buradan hareketle denklem (2.1) ile verilen Planck denkleminde göre, eğer yayılımın frekansı biliniyorsa, taşıdığı enerji hesaplanabilir. Bu denklem kullanılarak, yarıiletken malzeme üzerinde fotoakım oluşturabilecek en büyük dalgaboyu olan kesilim dalgaboyu hesaplanabilir. Yayılımın frekansı ile taşıdığı enerji arasında sabit bir oranın olduğunu anlaşılmıştır. Bu sabit değere Planck sabiti denir.

$$\lambda_c(\mu m) = \frac{h \cdot c}{E_g(eV)} \text{ or } E_g = hf \quad (2.1)$$

$\lambda_c$  : Kesilim dalgaboyu( $\mu m$ )

$E_g$  : Kuşaklararası enerji farkı (eV)

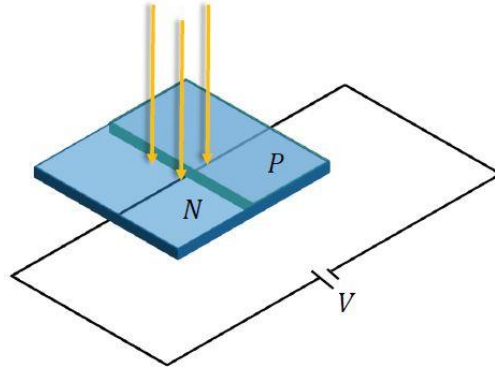
$h$  : Planck sabiti =  $6.62607004 \times 10^{-34}$  m<sup>2</sup>Kg/s

$c$  : Işık hızı = 299 792 458 m / s

$f$  : Frekans (Hz)

Yarıiletken kuşak yapısı incelendikten sonra fotovoltaik dedektörlerin çalışma prensibi daha iyi anlaşılabilir. Fotovoltaik dedektörlerin çalışma prensibi fotoelektrik olay ile açıklanabilir. Buna göre Şekil 2.5 ile verilen ters kutuplanmış haldeki

dedektör malzemesi üzerine çarpan fotonlardan kuşaklararası enerji farkından daha çok enerji taşıyanları, PN eklemının her iki yanında elektron-deşik çiftlerinin (*İng.* Elektron-hole pairs) oluşmasını sağlar. Arınma bölgesi (*İng.* Depletion region) içinde oluşan elektrik alanı sayesinde elektrik akımı akmaya başlar. Sonuçta, dedektör malzemesi tarafından emilen foton enerjisi, çıkıştan ölçülebilir elektrik akımı veya gerilim olarak okunur. Bu çalışma prensipleriyle fotovoltatik dedektörler güneş hücrelerine (*İng.* solar cell) benzerler.



Şekil 2.5–Ters Kutuplanmış PN Eklemi ve Eklem Üzerine Düşen KÖ Yayılım [13]

Dedektörlerin aktif algılayıcı malzemesinin üzerine düşen her elektromanyetik yayılım fotoelektrik olayın gerçekleşmesini sağlamaz. Belirli aktif algılayıcı malzemeler, sadece belirli dalga boylarındaki elektromanyetik yayımları elektrik sinyaline dönüştürebilir. Örneğin; 190 ile 1100 nm arası dalgaboylarındaki yayımların ters kutuplanmış (*İng.* reverse bias) haldeki silisyum tabanlı PN eklemi üzerine düşmesiyle fotoelektrik akım oluşabilir. Fotodiyot üzerine düştüğünde akım oluşturabilen maksimum dalgaboyu, fotodiyot malzemesinin kesilim dalgaboyudur. KÖ dedektör olarak kullanılan her malzeme için belirli bir kesilim dalga boyu bulunmaktadır. Kesilim dalga boyundan daha büyük dalga boyunda gelen yayımlar, malzeme üzerinde fotoelektrik olay gerçekleştirmez.

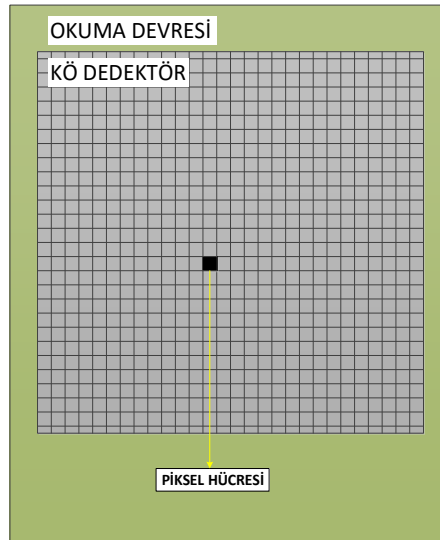
KÖ dedektör üretiminde kullanılan bazı malzemeler için kesilim dalgaboyları Tablo 2.2 ile verilmiştir. Her bir malzeme için karşılarındaki dalgaboyundan daha büyük dalgaboyunda ışınım, malzemedeki fotoelektrik olayı gerçekleştirmez. Şu anda dünyada yaygın olarak kullanılan MCT (HgCdTe) malzemesine tabloda yer

verilmemiştir. Bu malzemenin üretiminde kullanılan alt–bileşenlerinin miktarları değiştirilerek algılayabileceği spektral aralık ayarlanabilmektedir.

Tablo 2.2–KÖ Dedektör Üretiminde Kullanılan Bazı Malzemeler için Kesilim Dalgaboyu ( [14]' den uyarlanmıştır)

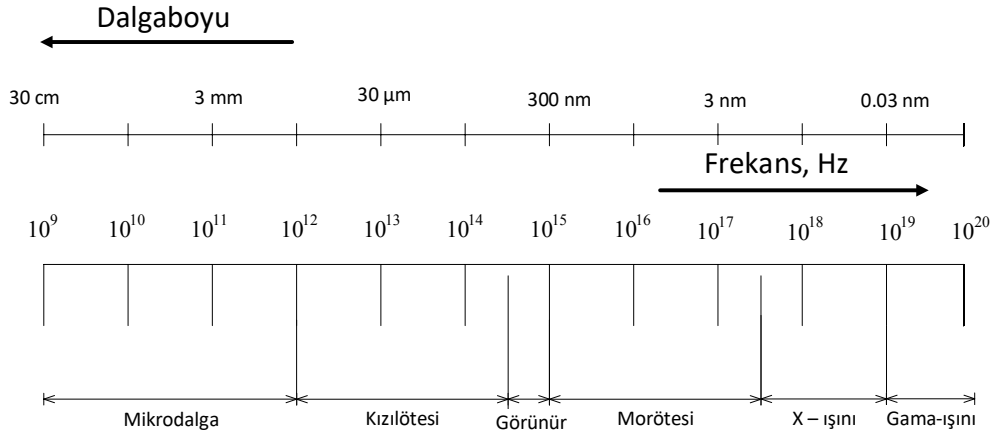
Malzeme	Enerji farkı (eV) @ 300K	Kesilim Dalgaboyu ( $\mu\text{m}$ )
Ge	0.66	1.87
Si	1.12	1.11
SiC	2.9	0.42
InSb	0.18	7
InAs	0.35	3.5
$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	0.75	1.65

Birinci bölümde KÖ dedektörlerin ilk olarak tek piksel formunda ortaya çıktığı daha sonra odaksal düzlem dizisi olarak isimlendirilen iki boyutlu sıralı piksel bölgeleri formunda dedektörlerin üretildiği belirtilmişti. Günümüzde de yoğun olarak kullanılan iki boyutlu piksel dizileri yapısındaki odaksal düzlem dizisi Şekil 2.6 ile verilmiştir. Küçük kare bölgelerin her biri bir piksel hücresi olarak isimlendirilir.



Şekil 2.6–Odaksal Düzlem Dizisi Yapısındaki KÖ Dedektör

## 2.2. Kızılötesi Görüntü Alma Süreci



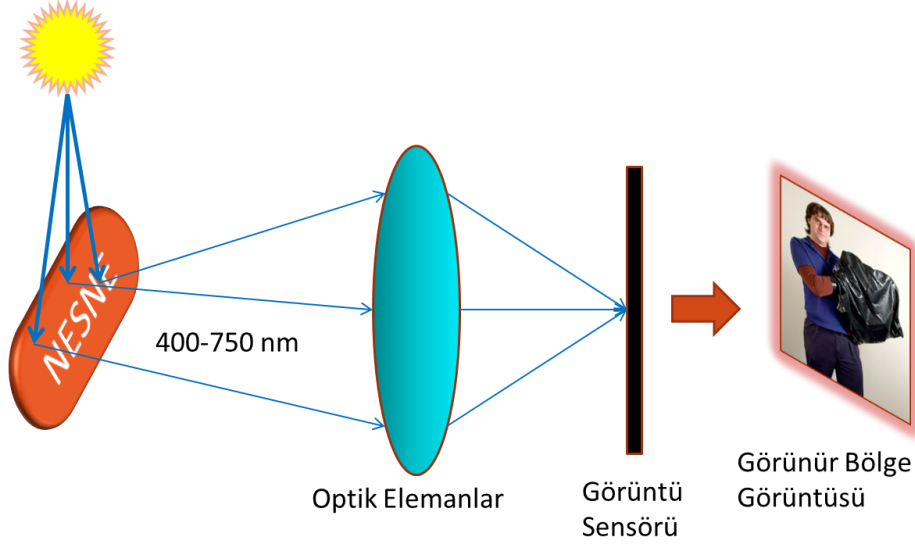
Şekil 2.7–Elektromanyetik Spektrum

Şekil 2.7 ile verilen elektromanyetik spektrumda 400 *nm* ile 750 *nm* dalga boyu aralığında yayılımlar gözle görülebilirler ve görünür bölge olarak isimlendirilirler. Bu dar görünür bölgedeki dalga boylarında yayılım olması için çoğunlukla bir ışık kaynağına ihtiyaç duyuluyor. Geceleri güneş gibi bir ışık kaynağının olmaması nedeniyle karanlıkta görünür bölge kamerasıyla alınan görüntülerde nesnelere görünmez. Kızılötesi (KÖ) dalgaboylarında görüntüleme yapılması fikrinin gece görüş problemlerinin çözümüyle yakından ilgili olduğu önceki bölümde ifade edilmişti. Buna göre ortamda başka ışık kaynağı olmasa ya da ışık şiddeti düşük olsa bile nesnelere kendi ısı enerjilerinden dolayı yaptıkları elektromanyetik yayılımlar, gece nesnelere tespitinde kullanılabilir [15].

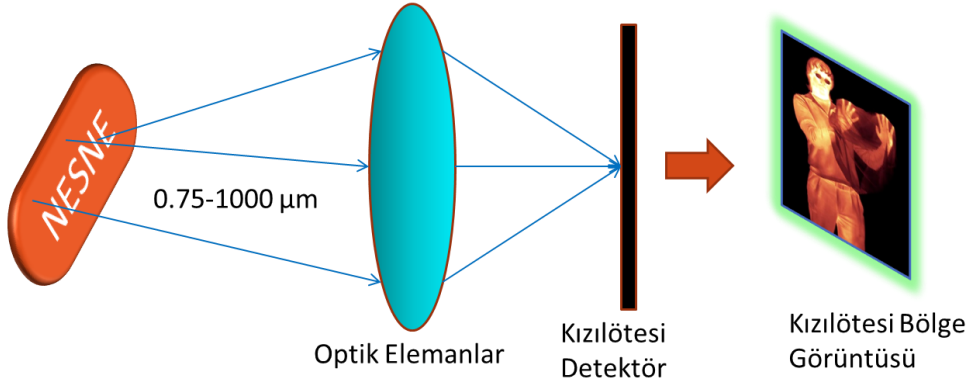
Görünür bölgenin en kısa dalgaboyu mor renkli ışıktır. Mor ışıktan daha kısa dalgaboylu, 10–400 *nm* arasındaki yayılımlar Morötesi (MÖ) yayılımları olarak isimlendirilir. Kızılötesi (KÖ), Görünür Bölge ve Morötesi (MÖ) yayılımları özellikle inceleyen optik fizik dalı Radyometri olarak isimlendirilmektedir. Radyometri ışığın insan gözüyle algılanmasından çok taşıdığı enerjiyle ilgilenmektedir.

Görünür bölgede görüntü alma işleminin temel bileşenleri bir ışık kaynağı, ışık kaynağından çıkan ışık ışınlarını yansıtan bir nesne, nesneden yansıyan ışık ışınlarının düzgün bir şekilde odaklanmasını sağlayan optik bir sistem ile bu optik sistemden geçen görüntülerin üzerine düştüğü bir görüntü algılayıcısıdır. Bu görüntü algılayıcısı 400 *nm* ile 750 *nm* dalgaboyundaki görünür bölge olarak adlandırılan elektromanyetik yayılımları algılayabilecek aktif malzemeden üretilmiş olmalıdır.

Görünür bölgede görüntü alma işlemi Şekil 2.8 ile gösterilmiştir. Şekil 2.9 ile gösterilen KÖ bölgede görüntü alma işlemi, görünür bölgede görüntü alma işlemiyle benzerdir. KÖ bölgede görüntü elde etmek için, ayrıca bir ışık kaynağına gerek yoktur. Sıcaklığı mutlak sıfırın (*İng.* absolute zero) üzerindeki her nesne belirli bir dalgaboyunda KÖ ışınım yapmaktadır.



Şekil 2.8–Görünür Bölgede Görüntü Elde Edilmesi



Şekil 2.9–Kızılötesi Bölgede Görüntü Elde Edilmesi

Aynı nesnenin hem görünür bölge kamerası ile hem de kızılötesi kamera alınmış görüntüleri Şekil 2.10 ile gösterilmiştir. Gün ışığı kamerasıyla alınan soldaki görüntüde görünmeyen eller 7,5 µm ile 13 µm aralığındaki dalgaboylarını algılayabilen uzun dalga boyu kızılötesi (*İng.* long wave infrared) bir kamera ile



rahatlıkla görülebilmektedir [16]. Bunun nedeni görünür bölge yayılımlarının ince plastik torba içinde geçemezken, KÖ yayılımların ince plastik torbadan geçebilmesidir. Aynı şekilde görünür bölge görüntüsünde, adamın gözlük camından gözleri görülebilirken, UDKÖ(LWIR) bölge görüntüsünde gözlük camları opak davranmakta ve gözleri görünmemektedir.

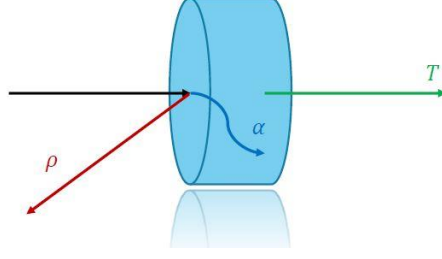


Şekil 2.10–Aynı Nesnenin Görünür Bölge ve Kızılötesi Bölge Görüntüsü [16]

### 2.2.1. Atmosferik Geçirgenlik

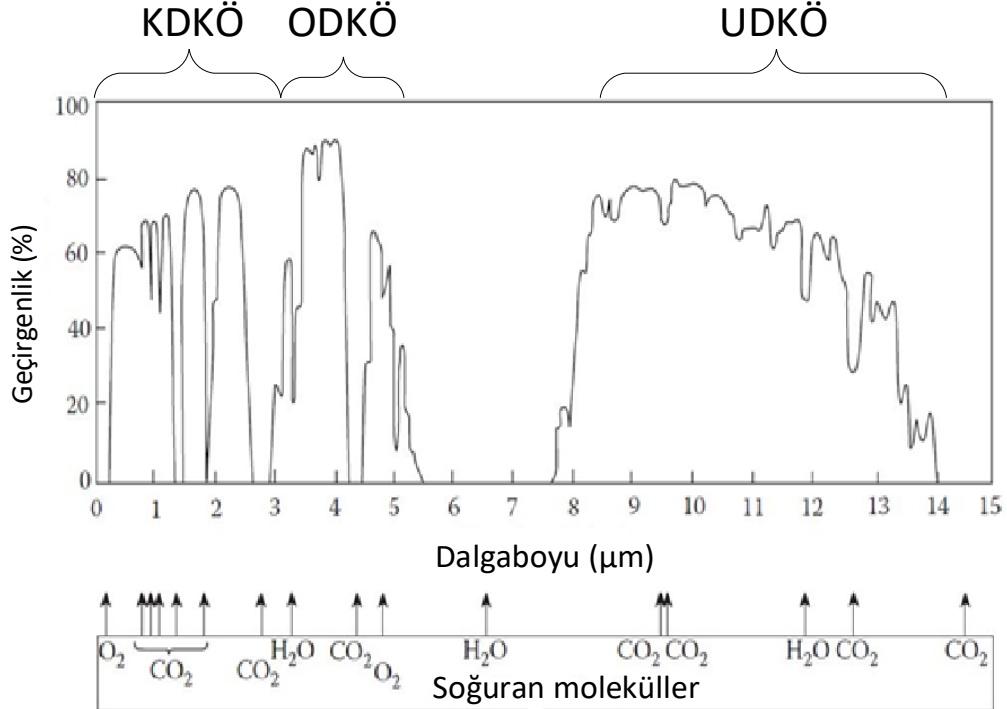
Dar bir dalgaboyu aralığına sahip olan görünür bölgeye göre, KÖ bölge daha geniş dalgaboyu aralığına sahiptir. Bununla birlikte bu geniş dalgaboyu aralığının her noktasında KÖ görüntüleme sistemleri geliştirilmez. Bunun en önemli sebebi atmosferik geçirgenliktir. Atmosferde yayılan bir KÖ yayılım bir nesneye çarpınca, Şekil 2.11 ile verilen şu üç durum belirli oranlarda gerçekleşebilir: İletim (*İng.* Transmission), soğurulma ya da emilim (*İng.* Absorbing) ve yansıtma (*İng.* Reflection). Enerjinin korunumu prensibi gereği, bu üç durumun taşıdığı toplam enerjinin nesneye gelen ışınımın taşıdığı enerji kadar olması gerekir. Kirchhoff Yasası olarak bilinen bu durum denklem (2.2) ile verilmiştir.

$$\alpha + \rho + T = 1 \quad (2.2)$$



Şekil 2.11–Elektromanyetik Yayımlar için Kirchhoff Yasası [13]

KÖ yayılımının nesneye çarpması sonucu saçılma (*İng.* Scattering) durumu da ortaya çıkabilir. Özellikle atmosferdeki yayımların dalgaboylarından daha küçük moleküllere çarpmaları sonucu ortaya çıkan saçılmalar Rayleigh saçılması olarak isimlendirilir. Hangi durumun ortaya çıkacağı KÖ ışınımının dalgaboyu, ışınımın çarptığı nesnenin kimyasal özellikleri ile molekül yapısı ve molekül boyutu ile ilgilidir. Buna göre atmosferde bulunan belirli gazlar, belirli dalgaboylarındaki KÖ yayımlarını soğurmaktadır [17]. Şekil 2.12 ile gösterilen moleküller, karşılık gelen dalgaboylarındaki yayımları soğururlar. Bu yüzden atmosferde soğurulan bu dalgaboylarında KÖ görüntüleme sistemleri geliştirilmesi tercih edilmez.



Şekil 2.12–Kızılötesi Bölgede Atmosferik Geçirgenlik ( [18]' den uyarlanmıştır.)

Örneğin, atmosferdeki  $H_2O$  tanecikleri 6 ile 8  $\mu m$  arasındaki KÖ yayılımları soğurur. Yine, atmosferdeki  $CO_2$  tanecikleri 2,7  $\mu m$  , 4,3  $\mu m$  ve 15  $\mu m$  dalgaboylarındaki KÖ yayılımları soğurur. Bu tür soğurmalardan dolayı KÖ bölgeler ortaya çıkar. KÖ elektromanyetik yayılımlar üç temel bölgeye ayrılır. Bunlar Kısa Dalgaboyu Kızılötesi (İng. SWIR), Orta Dalgaboyu Kızılötesi (İng. MWIR) ve Uzun Dalgaboyu Kızılötesi (İng. LWIR) olarak isimlendirilir.

Kızılötesi bölgelerin daha detaylı sınıflandırması Tablo 2.3 ile verilmiştir.

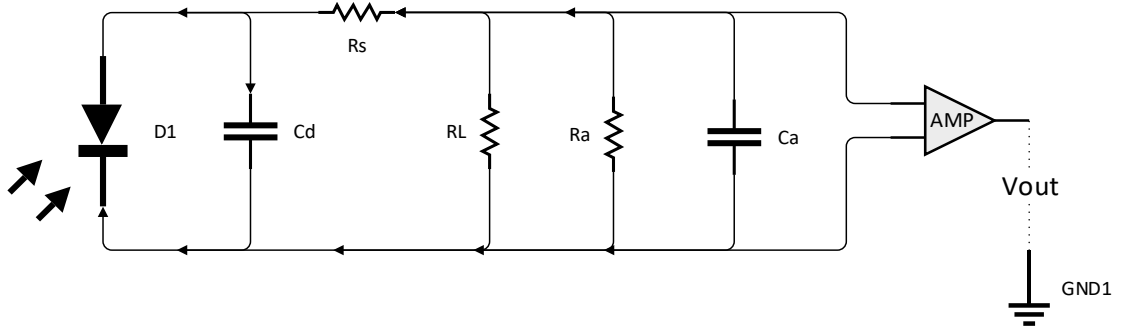
Tablo 2.3–Kızılötesi Bölgelerin Sınıflandırılması ( [12])

Kızılötesi Bölgeler	Dalgaboyu ( $\mu m$ )
Yakın Kızılötesi (İng. NIR)	0,78 – 1
Kısa Dalgaboyu Kızılötesi (İng. SWIR)	1 – 3
Orta Dalgaboyu Kızılötesi (İng. MWIR)	3 – 5
Uzun Dalgaboyu Kızılötesi (İng. LWIR)	6 – 15
Çok Uzun Dalgaboyu Kızılötesi (İng. VLWIR)	15 – 30
Uzak Kızılötesi (İng. FIR)	30 – 100
Milimetre-altı (İng. Submilimeter)	100 – 1000

Kızılötesi görüntü algılayıcıları da tespit edebildikleri yayılım bölgesine göre isimlendirilir. Örneğin, 1 ile 3  $\mu m$  dalgaboylarındaki yayılımı tespit edebilen KÖ görüntü algılayıcısı KDKÖ(SWIR) dedektör, 3 ile 5  $\mu m$  dalgaboylarındaki yayılımları tespit edebilen KÖ görüntü algılayıcısı ODKÖ(MWIR) dedektör, 6 ile 15  $\mu m$  dalgaboylarındaki yayılımları tespit edebilen KÖ görüntü algılayıcısı UDKÖ(LWIR) dedektör olarak isimlendirilir.

## 2.2.2. Kızılötesi Foton Dedektörlerinde Görüntü Alma Süreci

Şekil 2.6 ile verilen odaksal düzlem dizisindeki her bir piksel hücresinde bulunan KÖ dedektör yapısı elektriksel olarak Şekil 2.13 ile verilen fotodiyotlu devre ile modellenebilir.



Şekil 2.13–Üzerine KÖ Yayılım Düşürülmüş Fotodiyot Eşdeğer Devresi

D1: Piksel hücresindeki eşdeğer fotodiyot,

Cd: PN eklemi ve paketleme sığası toplamı,

Rs: Eşdeğer fotodiyot küçük seri direnci,

RL: Yük,

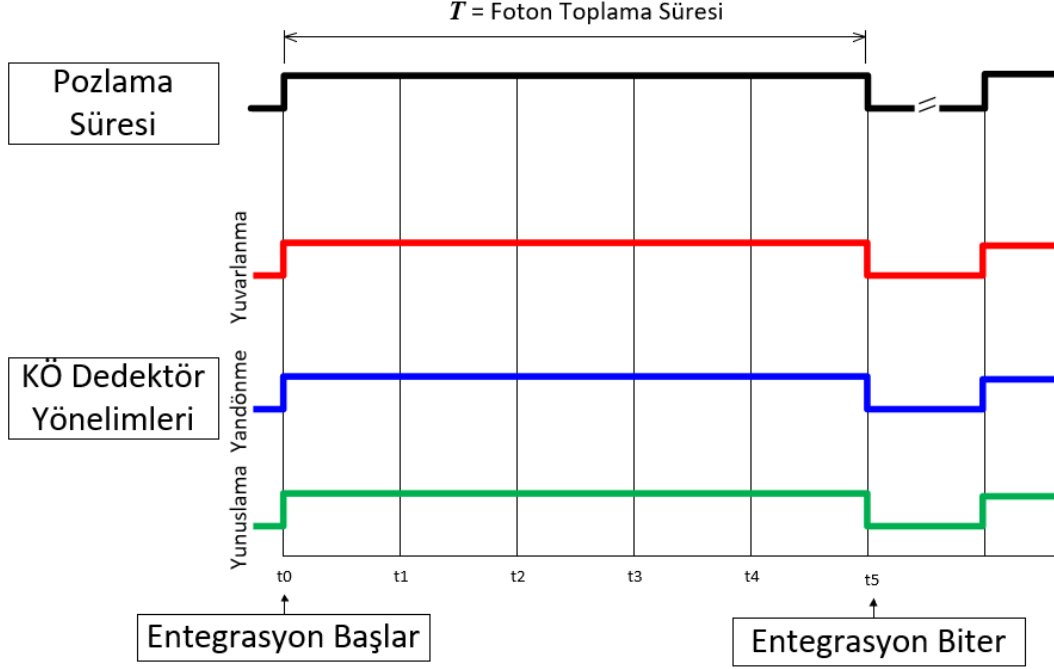
Ra: Yükselteç giriş direnci,

Ca: Yükselteç giriş sığası,

Amp: Yükselteç.

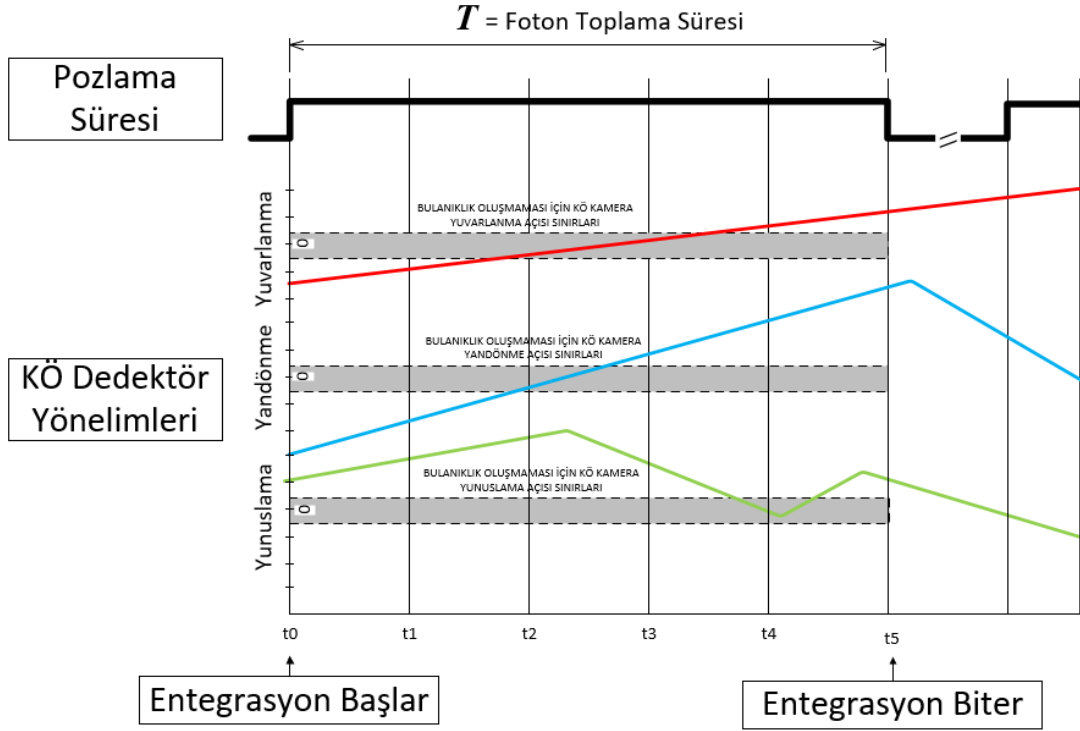
Piksel hücresinde bulunan KÖ dedektör aktif malzemesi üzerine düşen KÖ ışınım sayesinde gerçekleşen fotoelektrik olay sonucu oluşan elektrik akımı ile  $C_d$  kapasitörü belirli bir süre boyunca şarj olur. Şarj olma süresi kullanıcı tarafından belirlenebilir, ancak aktif algılayıcı malzemenin kuantum verimliliği ve tepkiselliğine göre alt ve üst sınırı bulunmaktadır. Bu süreye pozlama süresi (*Ing.* integration time) denir. Pozlama süresi boyunca şarj olan  $C_d$  kapasitöründen okunan gerilim ile görüntü algılayıcısı üzerine düşen yayılımın şiddeti arasında doğrudan bir bağıntı vardır. Net görüntüleme için pozlama süresi boyunca, gerçek dünya koordinatında bir noktadan çıkan KÖ yayılımının görüntü algılayıcısı üzerinde bir piksel bölgesine düştüğü kabul edilir. Bunun için KÖ görüntüleme sisteminin ya hiç hareket etmemesi

gerekir ya da hareketinin çok sınırlı olması gerekir. Eniyi durum olarak KÖ görüntüleme sisteminin pozlama süresi boyunca Şekil 2.14 ile verildiği gibi hiç hareket etmemesi gerekmektedir.



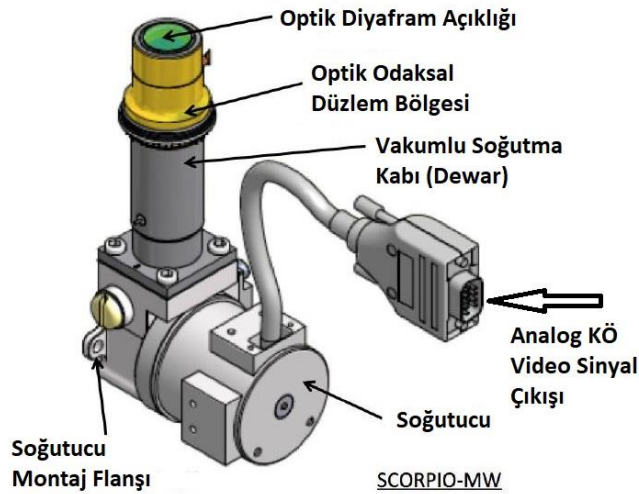
Şekil 2.14–KÖ Dedektör Hareketinden Kaynaklı Bulanıklık Oluşmaması İçin Eniyi Durum

Pozlama işlemi devam ederken  $-C_d$  kapasitörü fotodiyot üzerinden şarj olmaya devam ederken– KÖ dedektörü içinde barındıran kamera veya görüntüleme sisteminin hareketi Şekil 2.15 ile verildiği gibi belirli sınırları aşarsa, KÖ dedektör üzerindeki bir piksel bölgesine birden fazla gerçek dünya koordinatından çıkan KÖ ışınım düşmeye başlar ve böylece elde edilen KÖ görüntü bulanık görünür [19]. Elde edilen KÖ görüntülerde nesnelere görünürlüğünün artırılması amacıyla, daha uzun pozlama süreleri tercih edilebilmektedir. Düşük ışınım yoğunluğuna sahip nesnelere iyi görüş için uzun pozlama süresi tercih edilebilmektedir [20]. Yine uzay görüntülemelerinde düşük arka-plan ışınım yoğunluğunda uzun pozlama süreleri tercih edilir [21]. Özellikle uzun pozlama süreleri ihtiyacı durumunda bulanıklaşma oluşmaktadır.



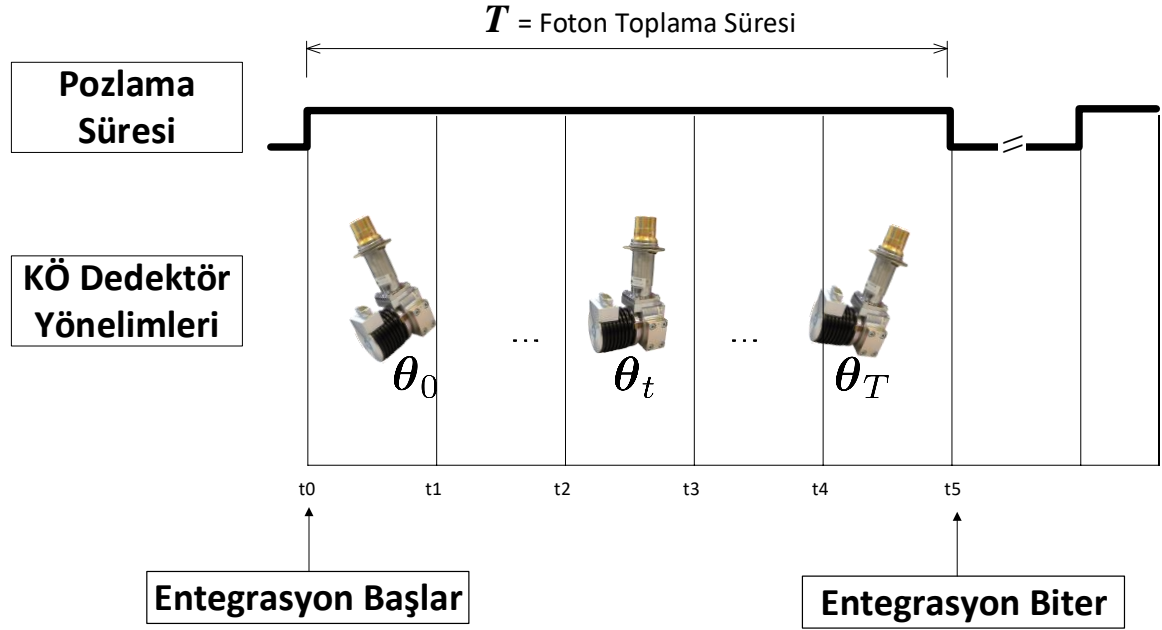
Şekil 2.15–KÖ Dedektör Hareketinden Kaynaklı Bulanıklık Oluşması Durumu

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda sterling soğutuculu, fotovoltaik, MCT yapısında, 640x512 formatında piksel aralığı  $15 \mu m$  olan KÖ dedektör kullanılmıştır. Kullanılan soğutuculu dedektör takımına benzer özellikte başka bir soğutuculu KÖ dedektörün mekanik şekliyle ilgili görsel Şekil 2.16 ile verilmiştir. Bu görseldeki KÖ dedektörün ağırlığı yaklaşık 650 gramdır [22]. Bu boyutlarda ve hafiflikteki KÖ dedektörün titreşim ve mekanik şok altında, uzun pozlama süreleri için, bulanık görüntüler vereceği değerlendirilmektedir.



Şekil 2.16–Soğutuculu ODKÖ Dedektör Bütünü ( [23]'den uyarlanmıştır)

KÖ dedektörün pozlama işlemine devam ederken yaptığı bulanıklığa sebep olan temsili yönelimler Şekil 2.17 ile verilmiştir.



Şekil 2.17–KÖ Dedektörün Pozlama Süresi Boyunca Hareket Etmesi

$\theta_0$  : Pozlama başlangıcı  $t_0$  anındaki dedektör yönelimi

$\theta_t$  : Pozlama süresi boyunca herhangi bir  $t$  anındaki dedektör yönelimi

$\theta_T$  : Pozlama bitişi  $T$  anındaki dedektör yönelimi

Dedektörün yaptığı hareket izin verilen sınırların dışında olursa, alınan KÖ görüntüde bulanıklık olacaktır. Bu durumda dedektör hareketinin ölçülmesi gerekmektedir. Dedektör hareketi dönüölçer (*İng.* gyroscope) kullanılarak ölçülecektir ve hareket Euler açıları ile ifade edilecektir. Hareket Yandönme, Yunuslama ve Yuvarlanma olarak isimlendirilen dönel açıları ile verilmiştir. Buna göre Şekil 2.17 ile verilen herhangi bir  $t$  anındaki KÖ dedektör yönelimi Euler açıları cinsinden,  $\theta_t = [Yandönme Yunuslama Yuvarlanma]$  şeklinde üç boyutlu bir vektördür. KÖ dedektörün yaptığı hareketin görüntüdeki bulanıklık etkisinin hesaplanabilmesi için azami pozlama süresi başlangıcında ve bitişinde olacak şekilde en az iki dönüölçer örneği (*İng.* sample) gereklidir. En az bu iki andaki dönüölçer örneği kullanılarak pozlama süresi boyunca KÖ dedektörün nasıl bir hareket yaptığı hesaplanabilir. Eğer pozlama başlangıcı ve bitişi arasında daha çok

dönölçer örneği alınabilirse, hesaplanan KÖ dedektör hareketinin doğruluğu da o kadar artacaktır.

Askeri sistem uygulamaları çoğunlukla nesne tespiti amaçlıdır. Çeşitli türde hava araçlarının özellikle güdüm, kontrol ve görsel seyrüsefer algoritmalarına da girdi olarak kullanılan KÖ görüntülerin azami düzeyde hatasız ve bozulmamış olması beklenir. Düşük kalitede alınmış görüntülerin algoritma başarımını olumsuz etkilediği anlaşılmıştır [24].

KÖ görüntülerin bozuk alınmasının çeşitli nedenleri bulunmaktadır. Bu bozulma görüntüleme sistemindeki optik veya elektronik elemanlardan kaynaklanıyor olabilir. Örneğin bulanıklık, odaklaması düzgün yapılmayan optik bir lensten kaynaklanabileceği gibi görüntü alma işlemine göre çok hızlı mekanik hareketler yapan kameradan da kaynaklanıyor olabilir [25]. Bozuk alınmış görüntüler elverişli olmaktan çıkarlar. Bu nedenle görüntüleme sisteminden bozuk alınan görüntülerin düzeltilmesi işlemleri çok çalışılan bir konu olmuştur. Bu problem karşısında ilk akla gelen çözüm görüntüleme sistemini daha iyi optik elemanlar kullanarak ve daha iyi kamera mekanik hareket kararlılığı sağlanarak tasarlamak olabilir. Fakat bu iş çoğu zaman tercih edilmez. Bu hem ekstra maliyet hem de karmaşık görüntüleme sistemleri tasarımlarına sebep olmaktadır. Bu noktada görüntülerdeki bozulmaların görüntü işleme teknikleriyle yok edilebileceği ya da en azından zayıflatılabileceği fikri ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, KÖ görüntüleme sisteminin maruz kaldığı titreşim ve mekanik şokun KÖ görüntü üzerindeki bozucu etkilerini incelenip, bozuk görüntünün düzeltilmesine, bulanıklığın zayıflatılması ya da görüntünün netleştirilmesi amaçlanmaktadır.

Tüm görüntü iyileştirme prosedürleri genel olarak şu ana adımlar oluşmaktadır. Birinci aşama, görüntüleme sisteminin dikkatlice hazırlanmış bir modelinin oluşturulması. Bu model görüntüleme sisteminin görüş alanı içinde bir 3B nokta ile alınan görüntüdeki 2B piksel bölgesi arasında dönüşümü açıklar. Böylece orijinal (bozulmamış) görüntü ile kamera tarafından bozulmuş olarak alınan görüntü arasındaki ilişki bağıntılar ve denklemler ile kurulmuş olacaktır. Sonraki aşama, bir önceki adımdaki modelin kullanılarak, orijinal görüntünün ne kadar bozulduğunun nicelik olarak ortaya çıkarılmasıdır. Bu çoğunlukla bir filtre hesaplanması ve kestirimidir işlemidir. Bu filtre bozucu etkileri içinde barındıran iki boyutlu bir matristir.



Sonraki aşama ise analitik veya nümerik yöntemler ile net görüntünün elde edilmesidir. Bu son aşama dekonvolüsyon (*İng.* deconvolution) olarak isimlendirilmektedir. Son aşama işlem karmaşıklığı açısından en belirleyici aşamadır.

### 3. BULANIKLAŞMA MODELLERİ

KÖ görüntüleme sisteminin mekanik şok veya titreşim nedeniyle yaptığı hareketlerin görüntüye çeşitli bozucu etkileri vardır. Bu bozucu etkilerden en bilineni görüntünün bulanıklaşmasıdır [26]. Kamera sallantı hareketlerinin görüntüye olan bozucu etkisini azaltmak üzere kardan (*İng.* gimbal) sistemleri geliştirilmiştir. Çoğunlukla iki ekseninde bulunan elektrik eyleyicilerinin (*İng.* electric motors), görüntüleme sistemi üzerindeki dönüölçer verisine göre kontrolü ile kardan stabilizasyonu yapılmaktadır. Mekanik olarak yapılan bu stabilizasyon işleminde eyleyici hız limitleri, eyleyici tork kontrolünde kullanılan sensörlerdeki düşük ölçüm doğruluğu, sürtünme ve bazı doğrusal olmayan bozucu etkiler kardan stabilizasyon yeteneğini düşüren faktörlerdir [27]. Kardan stabilizasyonu tekniği özellikle insansız hava araçları gibi yerleşim açısından çok kısıtlı imkanların olduğu sistemlerde oldukça fazla yer kaplamakta ve karmaşık yapılar olarak görünmektedir. Ayrıca kardan stabilizasyonunda görüntü bulanıklaşmasını engellemekten öte, sürekli olan video akışının daha kararlı (*İng.* stable) olması sağlanarak hedef tespit ve takip algoritmalarında bakış hattının (*İng.* line of sight) hedef doğrultusuna daha çabuk ve düzgün (*İng.* smooth) getirilmesi ve hedefin görüş açısından (*İng.* field of view) çıkmaması amaçlanmaktadır. Görüntüdeki bulanıklık, otomatik görüntü işleme algoritmalarının doğruluğunu ve başarımını doğrudan etkilemektedir [28]. Görüntü işleme ile yapılan otomatik hedef tanıma (*İng.* automatic target recognition), hedef durum kestirimi (*İng.* target state estimator), hedef takibi (*İng.* tracking) ve görsel seyrüsefer (*İng.* visual navigation) gibi algoritmalar bunlardan bazılarıdır.

Bulanıklığın giderilmesiyle ilgili gerekli literatür taraması yapılmıştır. Bulanıklık görüntü işleme ve bilgisayarlı görü literatüründe eskiden beri çalışan bir konudur ve bu yüzden oldukça zengin bir bilgi birikimi mevcuttur. Sürekli olarak gelişen ve yenilenen çalışmalarla birlikte güncelliğini sürdürmektedir. Literatürdeki yaklaşımlarda görüntü bulanıklığının giderilmesi probleminin birbiriyle ilişkili iki alt problemden oluştuğu anlaşılmaktadır. Bunlardan birincisi nokta yayılımı fonksiyonunun (*İng.* point spread function) hesaplanması veya kestirimi, ikincisi ise elde edilen NYF ile bulanık görüntü kullanılarak net görüntünün elde edilmesidir. Her iki alt–problem de birlikte veya ayrı ayrı olarak uzun zamandır tartışılan ve

üzerinde onlarca çalışma yapılan görüntü işleme ve bilgisayarlı görünün (*İng.* computer vision) temel konularından ikisidir.

Kamera hareketinin görüntü üzerinde oluşturduğu bulanıklık literatürde iki yaklaşımla incelenmiştir. Bunlar bulanıklığın tüm pikseller için aynı yön ve miktarda olduğunu kabul eden uzamsal-değişmeyen bulanıklık (*İng.* spatially-invariant blur) modeli ile bulanıklığın pikseller için farklı yön ve miktarlarda olduğunu kabul eden uzamsal-değişen bulanıklık (*İng.* spatially-varying blur) modelidir. Uzamsal-değişmeyen bulanıklık basit, anlaşılır ve görece düşük işlem karmaşıklığına sahip ama gerçek kamera hareketi bulanıklığını modellemede yetenekleri sınırlıdır. Uzamsal-değişen bulanıklık ise daha karmaşık ve gerçek kamera hareketini görece daha iyi modellemektedir. Kamera hareketinden kaynaklı bulanıklaşmış gerçek görüntülerin büyük çoğunluğu uzamsal-değişen bulanıklık taşırlar [29].

### 3.1. Uzamsal-Değişmeyen Bulanıklık

Kamera hareketinin, görüntü üzerinde düzgün dağılan bulanıklığa (*İng.* uniform blur) sebep olacağını kabul eden çalışmalar uzun süredir vardır. Richardson görüntü iyileştirme ile ilgili çalışmasında bozuk alınmış görüntüyü, net görüntü ile bozulmaya ait nokta yayılım fonksiyonunun doğrusal evrişimi (*İng.* convolution) olarak tanımlamıştır [30]. Bu durum dolaylı olarak görüntünün bozulmasına neden olan bulanıklığın tüm görüntü boyunca düzgün dağılan bir özelliğe sahip olduğu kabulünü getirir. Kamera hareketinin görüntü üzerinde düzgün dağılan bulanıklık etkisi bırakacağı kabulü yapılarak pek çok çalışma yapılmıştır [31] [32]. Uzun yıllar boyunca, bulanık görüntüler ya da genel anlamıyla bozuk alınmış görüntüler, net bir görüntü ile bozulma bilgisini içeren nokta yayılım fonksiyonunun doğrusal evrişimine belirli bir gürültü terimi eklenmesiyle denklem (3.1) ile verildiği gibi ifade edilmiştir.

$$b = i \otimes k + n \quad (3.1)$$

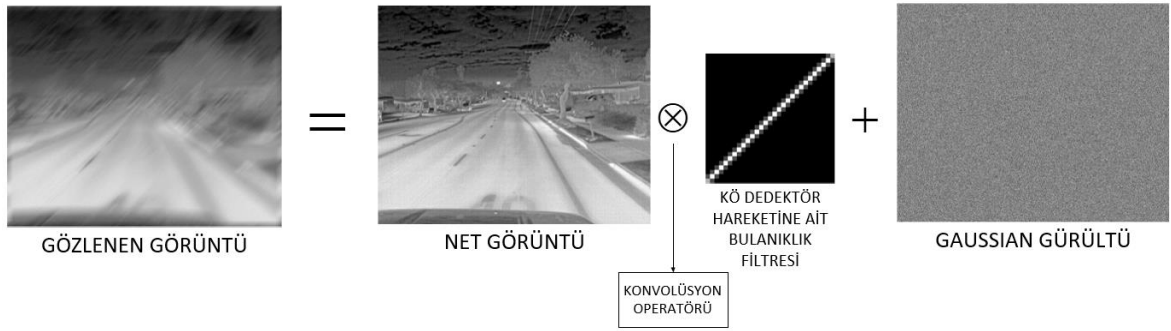
$b$  : Bulanık görüntü

$i$  : Net (bozulmamış) görüntü

$k$  : Bulanıklaşma filtresi (Nokta yayılım fonksiyonu)

$n$  : Gürültü terimi (Sıfır ortalamalı  $\sigma$  standart sapmalı Gaussian dağılıma sahiptir)

Pozlama süresi boyunca hareket eden kameradan alınmış görüntüdeki her bir piksel için aynı yön ve miktarda bulanıklık oluştuğunu kabul eden bu model literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak benimsenmektedir. Bulanıklık görüntü koordinatlarına bağlı olarak değişmeyip tüm pikseller için aynı olduğu için, uzamsal–değişmeyen bulanıklık (*Ing.* spatially–invariant blur) olarak isimlendirilmiştir. Oluşan bulanıklığı ifade edebilmek adına yönünü belirtmek için açı, miktarını belirtmek içinse piksel sayısını kullanan çalışmalar yapılmıştır [33]. Denklem (3.1) ile verilen modelin grafik olarak karşılığı Şekil 3.1 ile verilmiştir.



Şekil 3.1–Düzgün Dağılan Bulanıklık Modeli (Görüntü: [34])

İlerleyen dönemlerde, kamera hareketinden kaynaklı bulanıklığı daha iyi ifade edebilen bulanıklaşma filtreleri kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 3.1 ile verilen açı ve piksel sayısı cinsinden ifade edilebilen basit filtreler yerine, pozlama süresi boyunca kamera hareketinin yörüngesine benzeyen bulanıklaşma filtreleri kullanılmıştır. Bu filtreler daha gerçekçi filtrelerdir ve görüntü netleştirmede daha iyi sonuçlar alınmıştır.

Uzamsal–değişmeyen modelde bulanıklaşma filtresinin hesaplanması veya kestirimi eğer AÖB verisi gibi donanım desteği yoksa, çoğunlukla bulanık görüntünün kendisi kullanılarak yapılır. Bu nedenle bulanıklık filtresi kestirimi aşamasında oldukça uzun işlem süreleri ortaya çıkabilmektedir. Shan ve ark. 'ın yaptığı görüntü netleştirme çalışmasında örneğin, 800x600 boyutlarında bulanık bir görüntüyü netleştirmek için bulanıklaşma filtresi kestirimi ve dekonvolüsyon aşaması dahil toplamda 10 dakika sürdüğü bilgisi verilmiştir. Bunun yanında bulanıklaşma filtresi kestirimi işlemi hariç sadece dekonvolüsyon işlemi MATLAB

uygulamasında 30 saniye, C++ uygulamasında ise 10 saniye sürdüğü bilgisi verilmiştir [32]. Bu sonuç sadece bulanık görüntünün kendisini kullanarak, net görüntü ve bulanıklaşma filtresi eniyilime işlemi içeren görüntü netleştirme işinin oldukça uzun sürebildiğini göstermektedir.

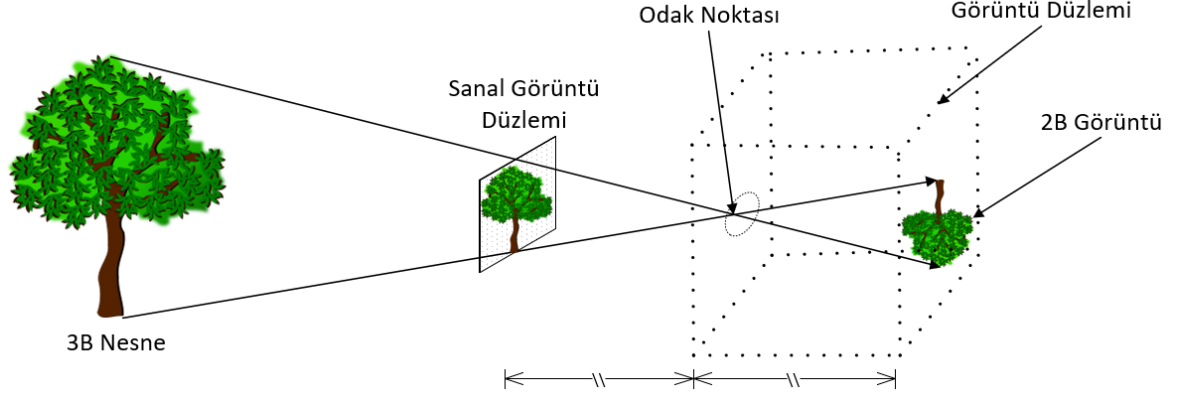
### 3.2. Uzamsal–Değişen Bulanıklık

Görüntü düzlemi boyunca değişen ve görüntünün farklı bölgelerinin farklı miktarlarda bozulduğunu kabul eden yaklaşımdır. Bu yaklaşımda bulanık görüntü net görüntü ile bozucu etkiye sahip filtrenin doğrudan doğrusal evrişimi ile tanımlanamaz. Bulanıklaşma vektör-matris çarpımı şeklinde modellenir. Çünkü görüntünün farklı bölgeleri için farklı filtreler ortaya çıkmaktadır.

Bulanıklaşma ya da genel olarak görüntü bozulmalarının evrişim ile modellenmesinin çeşitli kısıtları bulunmaktadır. Buna göre kamera sallantısı eğer görüntü sensörü düzleminde kalıyorsa evrişim modeli kullanılabilir. Görüntü sensörü düzlemi dışında yer alan özellikle yuvarlanma (*İng.* roll) hareketlerinde evrişim ile modelleme yetersiz kalmakta ve gerçek durumu tam olarak yansıtamamaktadır. Kamera sallantı hareketlerinde görüntünün her noktasının aynı miktarda ve aynı şekilde bozulmadığını anlaşılmıştır. Bu yaklaşım uzamsal-değişen bulanıklık modeli (*İng.* spatially-varying blurring) olarak isimlendirilmektedir. Bu modele göre kamera sallantısı sonucu görüntünün her bölgesi farklı miktarda ve farklı tipte bulanıklaşır. Daha açık bir tabir ile her bir piksel farklı miktarda ve farklı yönelimlerde bulanıklaşır. Bu modeldeki bulanıklık evrişim yerine vektör–matris çarpımları ile doğrusal dönüşüm kullanılarak modellenir. Görüntüdeki her bir piksel farklı miktarda ve farklı doğrultularda bozulmaya maruz kaldığı için bozulmanın modellenmesinde evrişim kullanılamaz.

Kamera sallantısının görüntü üzerindeki bozucu ve bulanık etkilerinin anlaşılabilmesi için, 3B sahne üzerindeki bir ışık kaynağından çıkan KÖ ışınımın kamera optik sisteminden geçerek, KÖ ODD üzerine nasıl düştüğünün anlaşılması gerekir. Bu sebeple bir kamera modelinin benimsenmesi gerekir. Görüntüleme sistemi olarak bugün çok yaygın şekilde kabul gören iğne–deliği (*İng.* pin – hole) kamera modeli benimsenmiştir. Bu model oldukça eski dönemlerden beri kabul gören yaygın bir modeldir [35]. Dış dünyadan gelen gelen ışık ışınları delikten

geçerek yüzey üzerine düşer. Fakat yüzey üzerine düşen nesne görüntüsü  $180^\circ$  ters dönmüş şekilde görünür. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda benimsenen kamera modeli Şekil 3.2 ile verilmiştir.

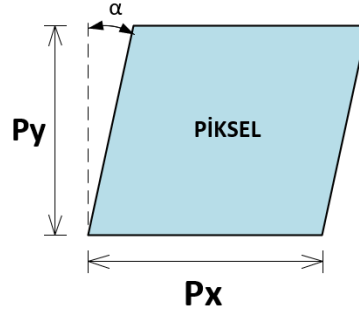


Şekil 3.2-İğne Deliği (İng. pin hole) Kamera Görüntüleme Sistemi Modeli

İğne-deliği kamera modelinde tüm görüntüleme sistemini açıklayan bazı değişkenler kullanılır [36]. Kamera hareketini tanımlayan değişkenlere dış (*İng.* extrinsic) değişkenler denir. Kameranın dış değişkenleri, kamera dönme (*İng.* rotational) ve doğrusal (*İng.* translational) hareketleridir. Kamera dış değişkenleri dönme ve doğrusal hareketler ile, gerçek dünya koordinat sistemini kameranın koordinat sistemiyle ilişkilendirir. Kameranın kendisini tanımlayan değişkenlere iç (*İng.* intrinsic) değişkenler denir. Kameranın iç değişkenleri ise, kameranın kendisini tanımlayan odak uzaklığı, optik merkez ve KÖ ODD' nin optik eksene göre eğrilik (*İng.* skew) katsayısıdır. KÖ ODD' nin optik eksene dik yerleştirilmişse, bu değişken sıfır olur.

Kameranın odak uzaklığı iç değişkendir. KÖ ODD' nin her iki ekseni için odak uzaklığı piksel sayısı cinsinden ayrı ayrı belirlenir. İkinci iç değişken optik merkezdir (*İng.* principal point). Optik merkez KÖ ODD' nin tam orta noktasında bulunan pikselin, piksel sayısı cinsinden koordinatıdır. Örneğin 128x128 formatındaki bir KÖ ODD için orta noktadaki pikselin koordinatı (64,64) olur. Diğer iç değişken ise, KÖ ODD dizisinin, optik eksene göre eğikliğidir.

İç değişkenlerin hesaplanması için Şekil 3.3 ile verildiği gibi bir piksel bölgesinin en ve boy bilgisi gerekmektedir.



Şekil 3.3–KÖ ODD Üzerindeki Bir Piksel Bölgesi

Kamera iç değişkenleri toplu şekilde bir matriste verilir. Bu matrise kamera iç matrisi denir. İç matris, geometrik kurallara göre çalışarak, kameranın görüş alanı içerisinde kalan kamera koordinatlarındaki 3 boyutlu (3B) bir noktayı, KÖ ODD düzlemindeki 2 boyutlu (2B) koordinatlarda bir noktaya taşıyan matristir. İç matris denklem (3.2) ile verilmiştir.

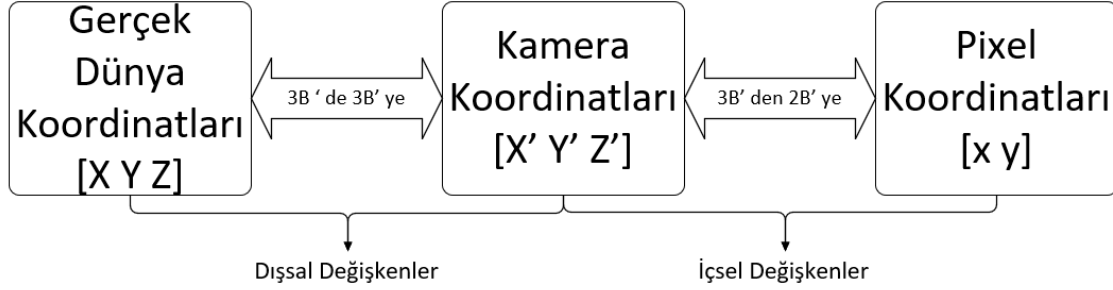
$$C = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ s & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Kamera iç matrisi hesaplanırken kullanılan terimler ve açıklamaları Tablo 3.1 ile aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.1–İç Parametrelerin Hesabında Kullanılan Terimler ve Açıklamaları

Parametre	Açıklama
$[c_x, c_y]$	Optik merkez, piksel sayısı cinsinden
$[f_x, f_y]$	Odak uzaklığı, piksel sayısı cinsinden
$[P_x, P_y]$	Piksel eni ve boyu, milimetre
$F$	Odak uzaklığı, milimetre
$f_x = F/P_x$	Odak uzaklığının bulunması
$f_y = F/P_y$	
$s = f_y \tan \alpha$	KÖ ODD' nin optik eksene göre eğikliği

Dış değişkenler kamera koordinat sistemiyle, gerçek dünya koordinat sistemi arasındaki bağıntıyı açıklayan kamera dönme ve doğrusal hareketleridir. Her ikisi aynı zamanda kamera pozisyonu veya kısaca poz olarak isimlendirilir. Sahne uzayında verilen 3B bir noktanın KÖ ODD düzlemindeki bir noktaya projeksiyon edilmesi işlemi Şekil 3.4 ile verilmiştir.



Şekil 3.4-3B Noktanın Kamera Optiğinden Geçerek Görüntü Sensörü Düzlemine Düşürülmesindeki Dönüşümler

Gerçek dünyadaki 3B bir noktayı, 2B görüntü düzlemindeki bir piksel bölgesine projeksiyon fonksiyonu isimli bir fonksiyon kullanılarak Şekil 3.4 ile gösterildiği gibi dönüştürebiliriz. İlk olarak, KÖ dedektörün pozlama süresi boyunca nasıl görüntü yakaladığını düşünelim. KÖ dedektörün görüş alanında baktığı sahne içindeki bir 3B noktadan  $(X, Y, Z)$  bir t anında gelen KÖ ışınım, KÖ ODD' nin yerleştiği görüntü düzlemindeki  $(x_c, y_c)$  koordinatlarındaki bir piksel bölgesi tarafından emilir. Bu projeksiyon işlemi denklem (3.3) ile verilmiştir. Buradaki  $P_t$  matrisi KÖ dedektör hareket ederse zamana bağlı olarak değişen bir matristir.

$$(x_c, y_c, 1)^T = P_t(X, Y, Z, 1)^T \quad (3.3)$$

Bu dönüşümdeki  $P_t$  matrisini detaylı incelenirse kamera dönme ve düzgün doğrusal hareket matrisiyle kameraya ait iç matrisi içerdiği görülür. Bu durumda hem iç hem de dış değişkenler sahne üzerindeki bir KÖ ışınım kaynağından çıkan KÖ ışınımın KÖ ODD üzerine nasıl düştüğünü açıklayan kamera projeksiyon denkleminde kullanılır.



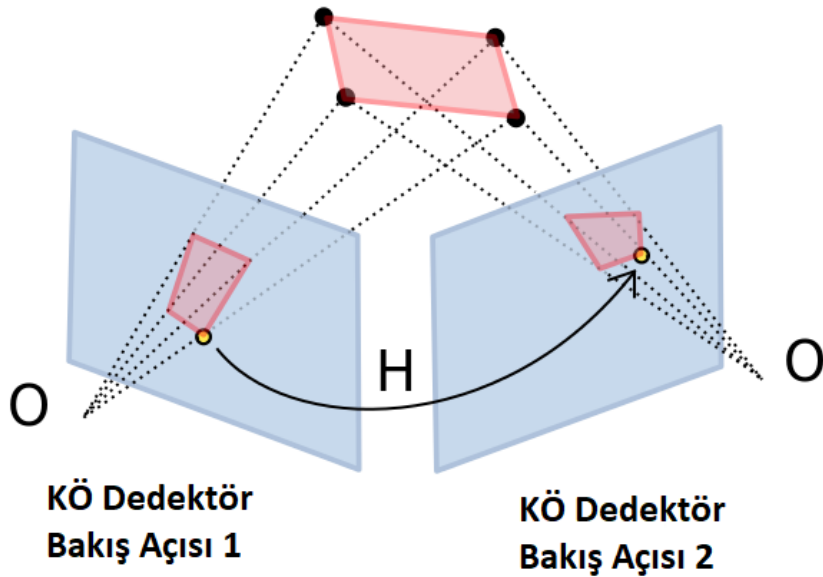
Buna göre gerçek dünya koordinatlarını KÖ ODD düzlemindeki koordinatlara çeviren denklem açık haliyle denklem (3.4) ile verilmiştir. Bu ifadenin sağ tarafındaki birinci matris kamera iç matrisidir. Sağ taraftaki ikinci matris ise kamera dönme ve doğrusal hareketlerinden oluşan dış değişkenleri içeren kamera poz matrisidir.

$$\lambda \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ s & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Pozlama süresi boyunca eğer kamera hareket ederse, denklem (3.4) ile verilen ifadenin sağ tarafındaki ikinci matristeki dönme ve çizgisel hareket terimleri değişir. Böylece sahnedeki sadece bir 3B noktadan, KÖ ODD üzerindeki bir 2B noktaya gelmesi gereken KÖ ışınımları, kamera hareket yörüngesine bağlı olarak birden fazla 3B noktadan gelir. Bu da görüntüde bulanıklık etkisi oluşturur [6]. Pozlama süresi boyunca yapılan bu hareketin yörüngesi 2B piksel bölgesi için nokta yayılım fonksiyonudur (*Ing.* point spread function). KÖ ODD düzlemindeki bir piksel noktası, kamera sallantı hareketine göre çizilen bir yörünge üzerindeki 3B noktalardan KÖ ışınımları alır. Bu hareket yörüngesi yeteri kadar küçük aralıklara bölünürse, doğrusal hareketlerin toplamı olduğu görülür. Buradaki her bir zaman aralığında kameranın bağıl konumu ya da yerdeğiştirmesi bilinirse kamera hareket yörüngesi hesaplanabilir. Bu nedenle bu tez çalışmasında, anlık yönelim bilgisinin bilinmesi için AÖB (ataletsel ölçüm birimi) gibi bir hareket sensörü kullanılmıştır.

### 3.2.1. Homografi

Pozlama süresi boyunca, KÖ dedektör hareketinin 2B görüntü üzerinde nasıl bulanıklık oluşturduğunu anlamak için homografi matrisleri kullanılmıştır. Homografi, aynı KÖ dedektörün farklı açılardan aldığı görüntüler arasındaki 2B dönüşüm yöntemidir. Böylece, net görüntü üzerindeki bir noktanın, KÖ dedektörün hareketi sonucu alınan yeni görüntüde nasıl hareket ettiği anlaşılır. Pozlama süresi boyunca her bir poz anında KÖ dedektörün homografi matrisi kullanılarak, net görüntü üzerindeki bir noktanın pozlama süresi boyunca nasıl hareket ettiği ve toplam hareket yörüngesi hesaplanabilir.



Şekil 3.5–Homografi dönüşümü ( [37]' dan uyarlanmıştır)

Bir bakış açısından alınan görüntüdeki bir noktayı, başka bir bakış açısından alınan görüntüdeki aynı noktaya dönüştüren matrise homografi matrisi denir. Bu dönüşüm Şekil 3.5 ile verilmiştir. Buna göre bulanıklaşmaya neden olan nokta yayılım fonksiyonlarını bulmak üzere homografi matrisleri kullanılmıştır. Homografi kamera hareketine bağlı olarak değişir.

Örneğin, t=0 anında görüntü üzerindeki bir noktanın, t anında hangi noktaya projeksiyon edileceği denklem (3.5) ile verilmiştir.

$$(x_t, y_t, 1)^T = H_t(d)(x_0, y_0, 1)^T \quad (3.5)$$

Denklem (3.5) ile verilen dönüşüm kullanılarak t anındaki bir pozdan alınan görüntüdeki belirli bir koordinattaki piksel değeri, t=0 anındaki pozdan alınan görüntüdeki aynı koordinattaki piksel değeri kullanılarak denklem (3.6) ile verildiği gibi hesaplanabilir.

$$I_t(x_t, y_t) = I(H_t(d)(x_0, y_0, 1)^T) \quad (3.6)$$

Homografi ifadesi denklem (3.7) ile verilmiştir [6].

$$H_d(t) = C(R_t + \frac{1}{d}T_tN^T)C^{-1} \quad (3.7)$$

$H_d(t)$  : belirli bir sahne derinliği için zamana bağlı değişen homografi fonksiyonu

$C$  : KÖ dedektör iç matrisi

$R_t$  : t anında KÖ dedektör dönme hareket matrisi

$d$  : sahne derinliği

$T_t$  : t anında KÖ dedektör doğrusal hareket matrisi

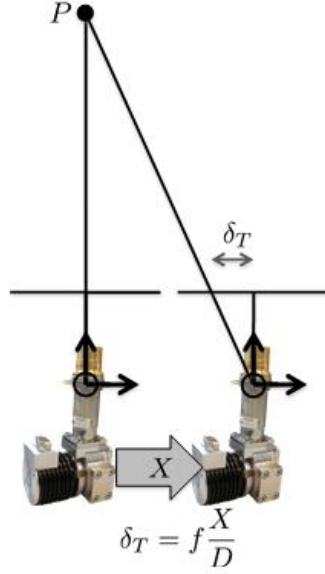
$N^T$  : Görüntü düzlemine dik olan birim vektör

### 3.2.2. KÖ Dedektör Hareketi

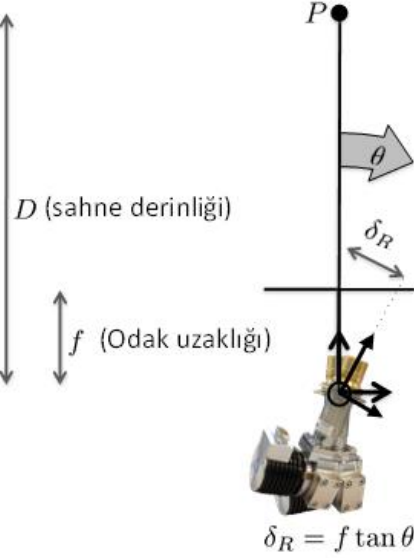
Görüntüleme sistemindeki KÖ dedektörün hareketleri dönme ve doğrusal hareketler olarak homografi ifadesindeki gibi ikiye ayrılabilir. Doğrusal harekette KÖ dedektör koordinat merkezi de kamerayla birlikte hareket ederken, dönme hareketlerinde KÖ dedektör koordinat merkezi sabit kalır. Dönme hareketleri kamera koordinat merkezi değişmeden, kameranın olduğu yerde yaptığı yuvarlanma (*İng.* roll), yunuslama (*İng.* pitch) ve yandönme (*İng.* yaw) hareketleridir.

KÖ dedektör dönme ve doğrusal hareketlerinden hangisinin bulanıklığa daha çok etkisinin olduğu anlamak üzere Whyte ve ark.'nın çalışmaları aşağıdaki gibi incelenmiştir [38]. Hesaplamalar için Şekil 3.6 ile verilen çizim kullanılmıştır.

### KÖ Dedektör Çizgisel Hareket



### KÖ Dedektör Rotasyon Hareketi



Şekil 3.6–KÖ Dedektörün Çizgisel ve Dönme (Rotasyon) Hareketlerinin Bulanıklığa Etkisi ([38]'den uyarlanmıştır)

Kameranın odak uzaklığının 1000 piksel olduğu varsayalım. Bu durumda görüntü üzerinde pozlama süresi boyunca kamera hareketinden dolayı 10 piksellik bulanıklık elde edilebilmesi için, kameranın yapması gereken düzgün doğrusal hareket ile dönme hareketini bulalım. Önce görüntüde  $\delta_T = 10$  piksellik bulanıklık görebilmek için kamera ne kadarlık düzgün doğrusal hareket yapmalıdır, buna bakalım:

$$\delta_T \text{ px} = \frac{X}{D} 1000 \text{ px} \quad (3.8)$$

$$X = \frac{D}{100} \quad (3.9)$$

Buna göre, KÖ dedektörden  $D = 1 \text{ m}$  ötedeki bir nesnenin alınan görüntüde 10 piksel kayık görünmesi için KÖ dedektör  $X = 1 \text{ cm}$  sağa hareket etmelidir. KÖ dedektörden  $D = 5 \text{ m}$  ötedeki nesnenin alınan görüntüde 10 piksel kayık görünmesi için KÖ dedektör  $X = 5 \text{ cm}$  sağa hareket etmelidir.  $D = 50 \text{ m}$  ötedeki nesne için KÖ dedektör  $X = 50 \text{ cm}$  sağa hareket etmelidir. Standart bir orta dalga kızılötesi

dedektörün pozlama süresi (tipik olarak 3 – 20 ms) için bu denli fazla yerdeğiştirme hareketi pek olası değildir.

Şimdi de görüntüde yine  $\delta_R = 10$  piksellik bulanıklık görebilmek için, KÖ dedektörün ne kadarlık dönme hareketi yapması gerekir, buna bakalım:

$$\delta_R px = \tan \theta \times 1000 px \quad (3.10)$$

$$\theta = 0.6^\circ \quad (3.11)$$

KÖ dedektör 15 cm genişliğinde olsun, bu durumda  $\theta = 0.6^\circ$  'lik dönme hareketi, eğer kamerayı bir insan elinde tutuyorsa, insan elinin pozlama süresi boyunca 1.5 mm yerdeğiştirme yapması anlamına gelir. Standart bir orta dalga kızılötesi dedektörün pozlama süresi (tipik olarak 3 – 20 ms) içinde, 1.5 mm 'lik yerdeğiştirme hareketi çok daha olasıdır. Buradan anlaşılacağı üzere, kameranın dönme hareketinden kaynaklı bulanık, kameranın düzgün doğrusal hareketinden kaynaklı bulanıklığa göre daha baskındır ve olasıdır. Buna göre, tezin bundan sonraki aşamalarında kamera hareketinden kaynaklı bulanıklığın büyük çoğunluğunun kameranın dönme hareketinden kaynaklandığı varsayımı ile devam edilecektir.

Kamera hareketinden kaynaklı bulanıklığın büyük çoğunluğunun kameranın dönme hareketinden kaynaklandığını artık biliyoruz. Bu yüzden denklem (3.7) içinde verilen düzgün doğrusal hareket terimi gözardı edilebilir. Böylece kamera homografi matrisi denklem (3.12) ile verilen ifadeye indirgenebilir. Ayrıca bu varsayım ile sahne derinliğinin görüntü boyunca hemen hemen değişmediği de kabul edilmiştir.

$$H_d(t) = CR_t C^{-1} \quad (3.12)$$

### 3.2.3. Bulanıklık Modeli

Bir  $t$  anındaki görüntü, aşağıdaki gibi vektör–matris çarpımı formunda da ifade edilebilir;

$$i_t = \mathbf{a}_t i \quad (3.13)$$

$i_t$  : Sütun vektör,  $t$  anındaki görüntü

$\mathbf{a}_t$  : Seyrek matris (*İng.* sparse matrice),  $t$  anındaki dönüşüm matrisi

$i$  : Sütun vektör, net görüntü

Sadece düzgün doğrusal hareket olursa veya kamera hareketi görüntü sensörü düzlemi içinde kalıyorsa, bu uzamsal-değişmeyen model olacağı için, doğrusal evrişim ile ifade edilebilir.  $\mathbf{a}_t$  seyrek matrisinin her bir satırı, bir piksel bölgesini  $(x_t, y_t)$  hesaplamak için gerekli olan ağırlıkları içerir. O andaki homografi dönüşümü kullanılarak, elde edilen noktaların interpolasyonu olarak hesaplamalar yapılır. Bu amaçla yönsüz aradeğer (*İng.* bilinear interpolation) bulma yöntemi ile dönüştürülmüş piksel değeri bulunur [6].  $\mathbf{a}_t$  seyrek matrisinin her bir satırında 4 değer vardır.

Gözlenen bulanık görüntü, kamera pozlama süresi boyunca tüm kamera konumlarında alınan ara görüntülerin belirli ağırlıklar ile çarpılarak toplamı şeklinde modellenebilir [39]. Bu durumda son gözlenen bulanık görüntü, pozlama süresi  $T$  boyunca, net görüntünün her poz anına ait homografik dönüşümlerinin toplamı halinde denklem (3.14) ile ifade edilebilir.

$$b = \int_0^T \mathbf{a}_t i dt + n \quad (3.14)$$

Pozlama süresi boyunca, KÖ dedektör hareketi küçük doğrusal aralıklara bölünür. Bu anların her birindeki KÖ dedektör yönelimi (*İng.* orientation), o ana ait KÖ dedektörün pozu (*İng.* pose) olarak isimlendirilir. Eğer bu anlara ait AÖB verisi alınır, KÖ dedektörün bu poz için dönme matrisi hesaplanıp ardından homografi matrisi bulunabilir.

Pozlama süresi boyunca (T), toplam bulanıklık matrisi ya da her bir piksel için NYF matrisi, ara bulanıklık matrislerinin toplamıdır ve denklem (3.15) ile verilmiştir.

$$\mathbf{k} = \int_0^T \mathbf{a}_t dt + \mathbf{n} \quad (3.15)$$

Böylece uzamsal-değişen bulanıklık modeli, denklem (3.16) ile verilen matris-vektör çarpımı şeklinde ifade edilebilir.

$$\mathbf{b} = \mathbf{k}\mathbf{i} + \mathbf{n} \quad (3.16)$$

$\mathbf{b}$  : Sütun vektörü, gözlenen bulanık görüntü

$\mathbf{k}$  : Seyrek matris (*İng.* sparse matrice), pozlama süresi boyunca KÖ dedektör hareketinin bulanıklık etkisini ifade eden filtre, dönüşüm

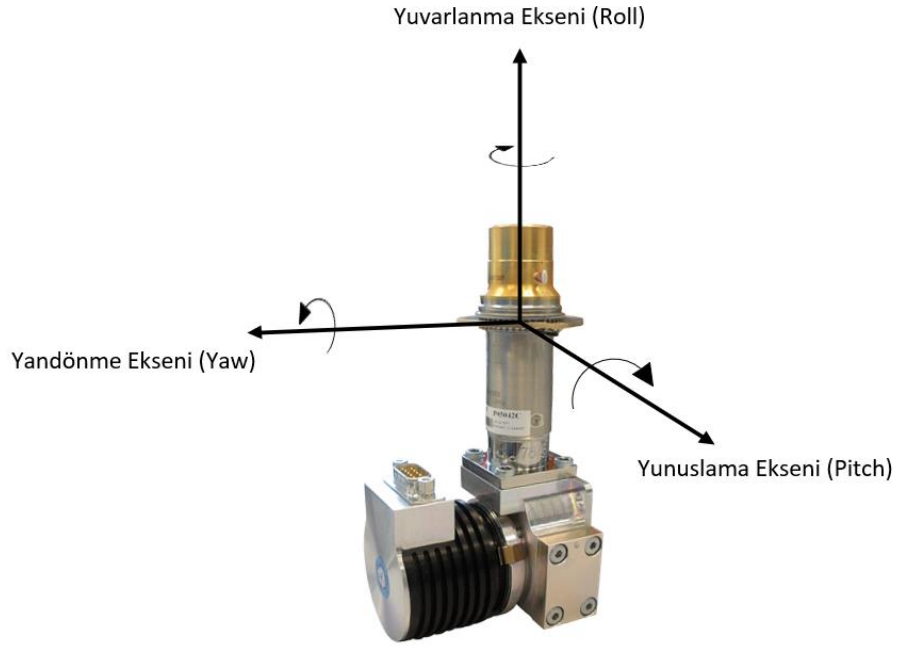
$\mathbf{i}$  : Sütun vektörü, net görüntü

$\mathbf{n}$  : Sütun vektörü, gürültü terimi ( $\mathcal{N}(0, \sigma)$ )

Yukarıdaki denklem ile verilen doğrusal dönüşümde  $\mathbf{b}$  ve  $\mathbf{i}$  sütun vektörleri  $\mathbf{k}$  ise büyük bir seyrek matris formundadır. Bu modelde görüntünün bütün bölgeleri için tek bir filtre yoktur. Bulanıklık filtresi uzama bağlı olarak değişecektir.

Bir t anındaki bulanıklaşma için dönüşüm matrisi olan  $\mathbf{a}_t$  matrisini hesaplamak üzere t anındaki homografi matrisinin bilinmesi gerekmektedir. Öncelikle bu matrister yer alan dönme matrislerinin tanımlanması gerekiyor. Bu nedenle pozlama süresi boyunca KÖ dedektörün belirli anlardaki yönelimlerine ait dönü verisi Euler açıları kullanılarak yandönme (*İng.* yaw), yunuslama (*İng.* pitch) ve yuvarlanma (*İng.* roll) olarak alınması gerekir.

KÖ dedektör yönelimlerini ölçmek için kullanılacak Euler açı eksenleri Şekil 3.7 ile verilmiştir.



Şekil 3.7–KÖ Dedektör Euler Açı Eksenleri

KÖ dedektör hareketi, dönme matrisleri kullanılarak ya da her üç eksendeki dönme ve düzgün doğrusal hareketlerini gösteren 6B (3 tanesi dönme, 3 tanesi düzgün doğrusal) hareket ile modellenebilir [38] [39]. Yukarıda KÖ dedektörün dönme hareketlerinin bulanıklık oluşmasında düzgün doğrusal hareketlerinden daha baskın olduğunu göstermiştik. Buna göre her üç ekseninde, -x, -y ve -z eksenlerinden orijin noktasına doğru bakıldığında, saat yönünün tersi yöndeki dönme hareketleri sonucunda kullanılacak her bir eksen için dönme matrisleri ile toplam dönme matrisleri sonraki sayfada verilmiştir [40]. Bu matrisler KÖ dedektör dış değişkenleridir.



-x eksenini etrafında saat yönünün tersi yöndeki  $\alpha$  radyanlık dönme hareketi sonucunda kullanılacak dönüşüm matrisi;

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

-y eksenini etrafında saat yönünün tersi yöndeki  $\beta$  radyanlık dönme hareketi sonucunda kullanılacak dönüşüm matrisi;

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

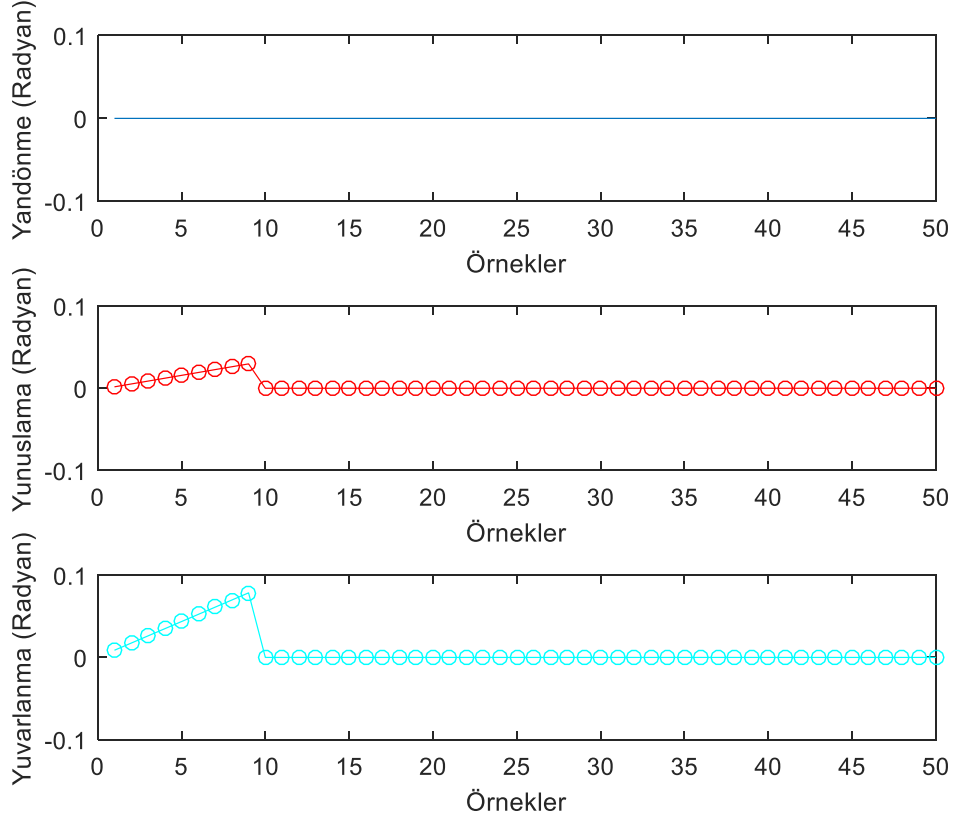
-z eksenini etrafında saat yönünün tersi yöndeki  $\gamma$  radyanlık dönme hareketi sonucunda kullanılacak dönüşüm matrisi;

$$R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

Dış dünya ile KÖ dedektör koordinat eksenleri arasındaki dönüşümü sağlayan toplam dönme matrisi denklem (3.20) ile verilmiştir;

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha) \quad (3.20)$$

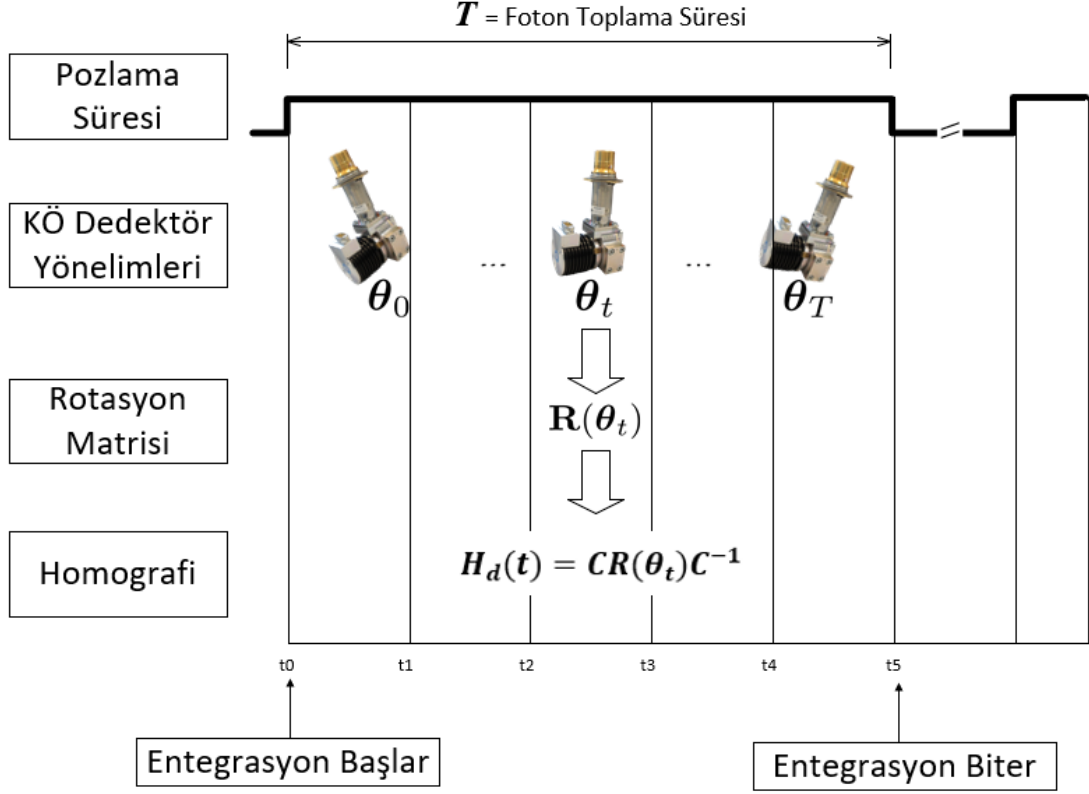
Şimdi pozlama süresi boyunca alınan AÖB verilerinden, KÖ dedektör hareketi kaynaklı bulanıklığı ifade eden filtrenin nasıl hesaplandığını göstereceğiz. Şekil 3.8 ile verilen KÖ dedektör hareket senaryosunu düşünelim.



Şekil 3.8–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu-0

Bu hareket senaryosu içerisinde, ilk 9 AÖB verisinin pozlama süresi içerisinde kaldığı kabul edilsin. Standart bir ODKÖ dedektörün pozlama süresi 3 ile 20 saniye arasında değişmektedir. Buna göre en 400Hz örnekleme frekansına sahip bir AÖB kullanılırsa istenilen sayıda örnek alınabilir. Pozlama süresi boyunca kullanılan AÖB örneği sıklığı arttıkça, KÖ dedektör hareketi çok daha doğru kestirilir ve hesaplanan bulanıklaşma filtresinin doğruluğu artar.

Pozlama süresi boyunca, her bir KÖ dedektör yönelimine ait AÖB verisinin alınıp dönme matrisinin ve ardından homografi matrislerinin hesaplanmasına ait işlem akışı Şekil 3.9 ile verilmiştir.



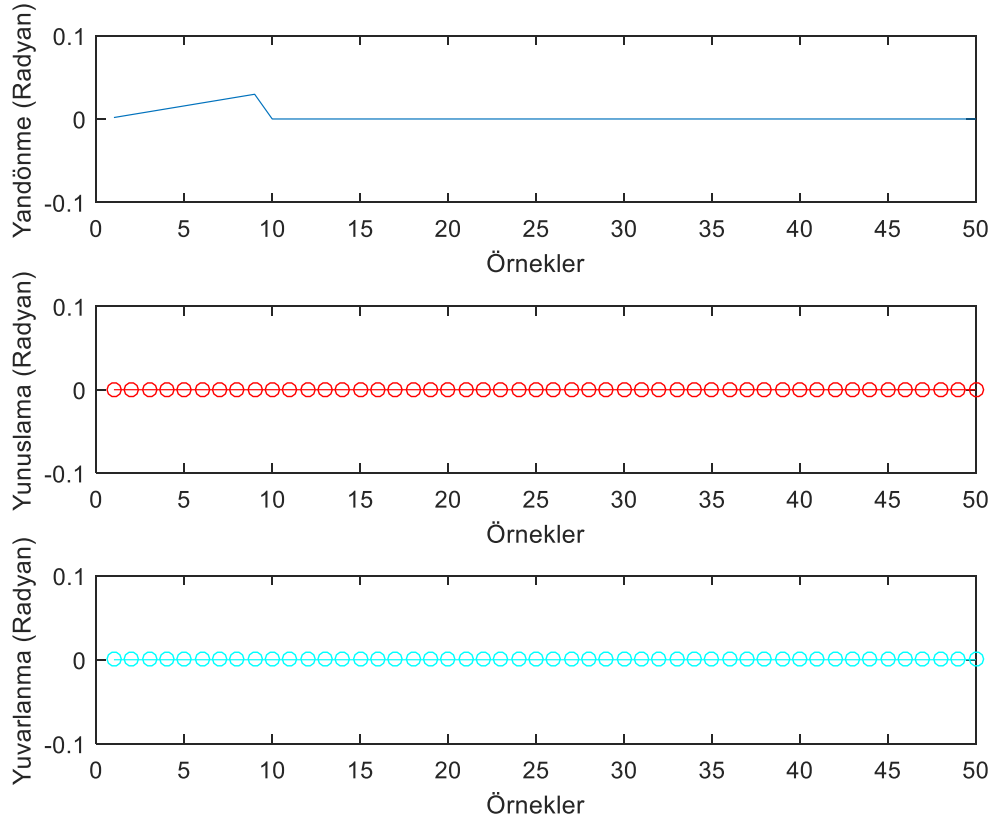
Şekil 3.9-Pozlama Süresi Boyunca KÖ Dedektörün Dönme Hareketinden Homografinin Hesaplanması

Aşağıda Şekil 3.10 ile pozlama süresi boyunca hareket eden bir KÖ dedektörün bazı anlardaki pozları verilmiştir. Bu her bir poz anındaki homografi matrisleri, o andaki AÖB verisinden hesaplanır ve ardından bu anlardaki homografiler yukarıda anlatılan yöntemle toplanarak bulanıklık matrisi hesaplanır.



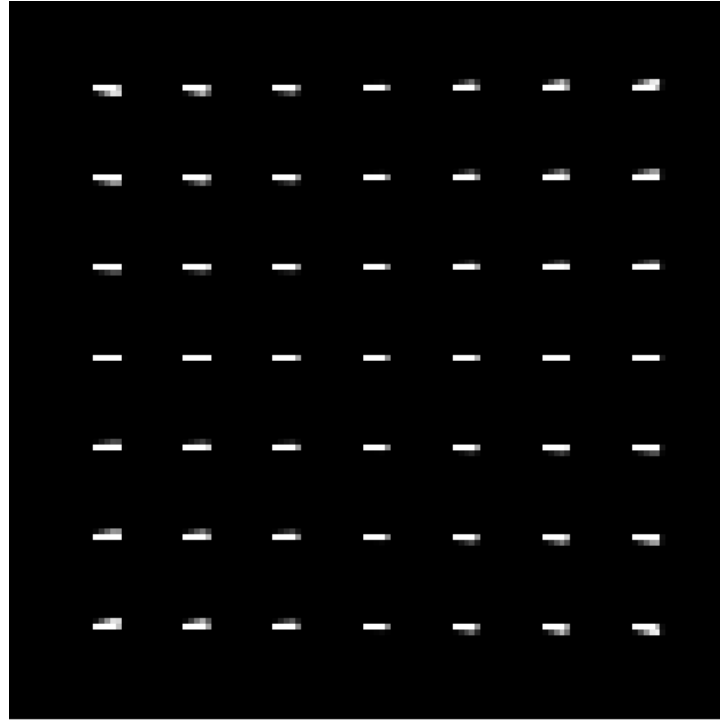
Şekil 3.10–Pozlama Süresi Boyunca Bazı Anlardaki KÖ Dedektör Pozları



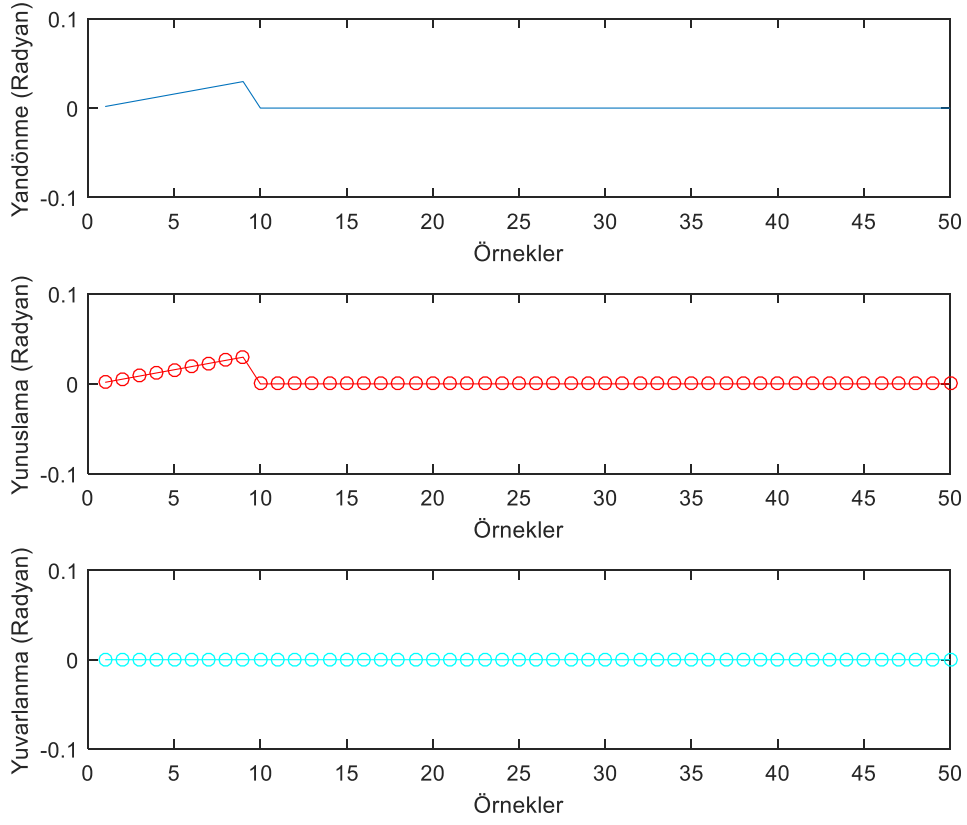


Şekil 3.13–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu–1

Pozlama süresi boyunca yapılan Şekil 3.13 ile verilen hareket sonucu ortaya çıkan bulanıklığa ait NYF' ler bazı pikseller için Şekil 3.14 ile verilmiştir.

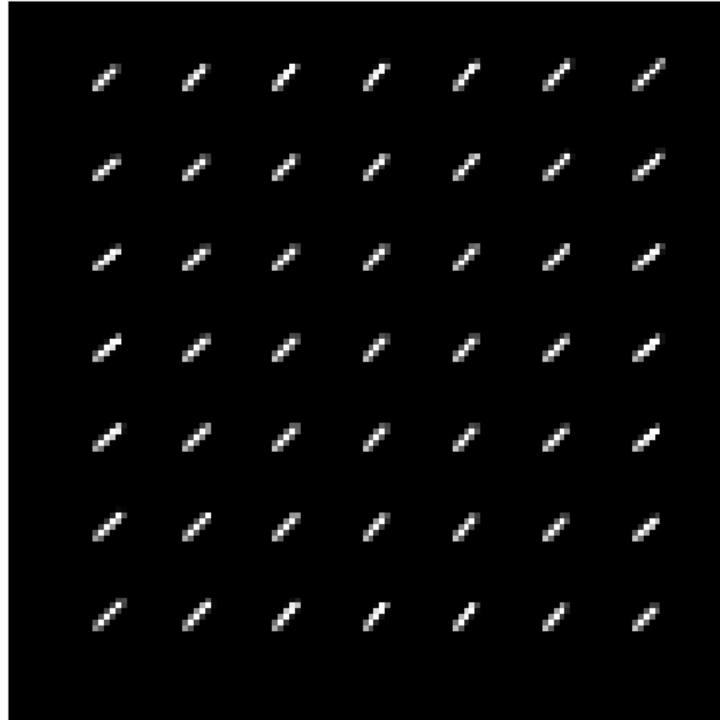


Şekil 3.14–Hareket Senaryosu–1 İçin Bazı Piksellerin Nokta Yayılım Fonksiyonları

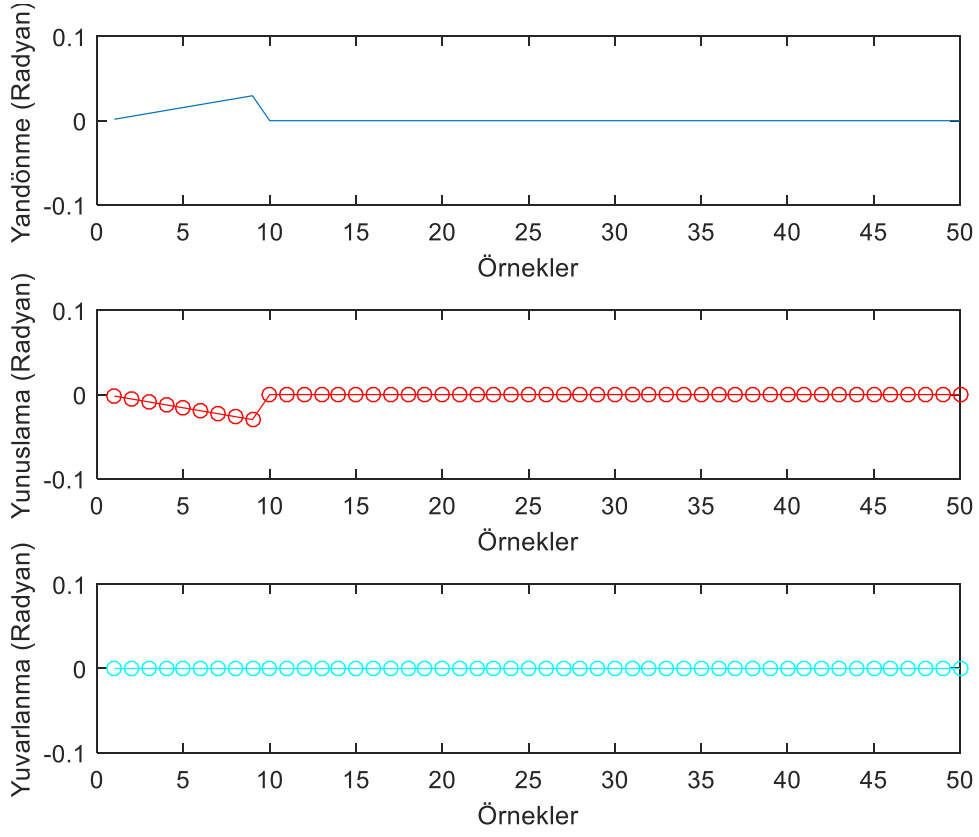


Şekil 3.15–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu–2

Pozlama süresi boyunca yapılan Şekil 3.15 ile verilen hareket sonucu ortaya çıkan bulanıklığa ait NYF' ler bazı pikseller için Şekil 3.16 ile verilmiştir.

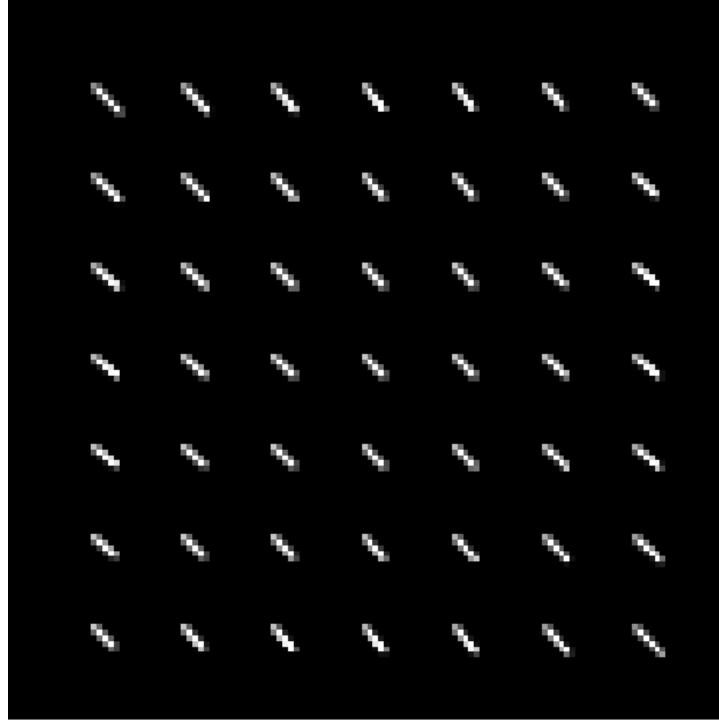


Şekil 3.16–Hareket Senaryosu–2 İçin Bazı Piksellerin Nokta Yayılım Fonksiyonları

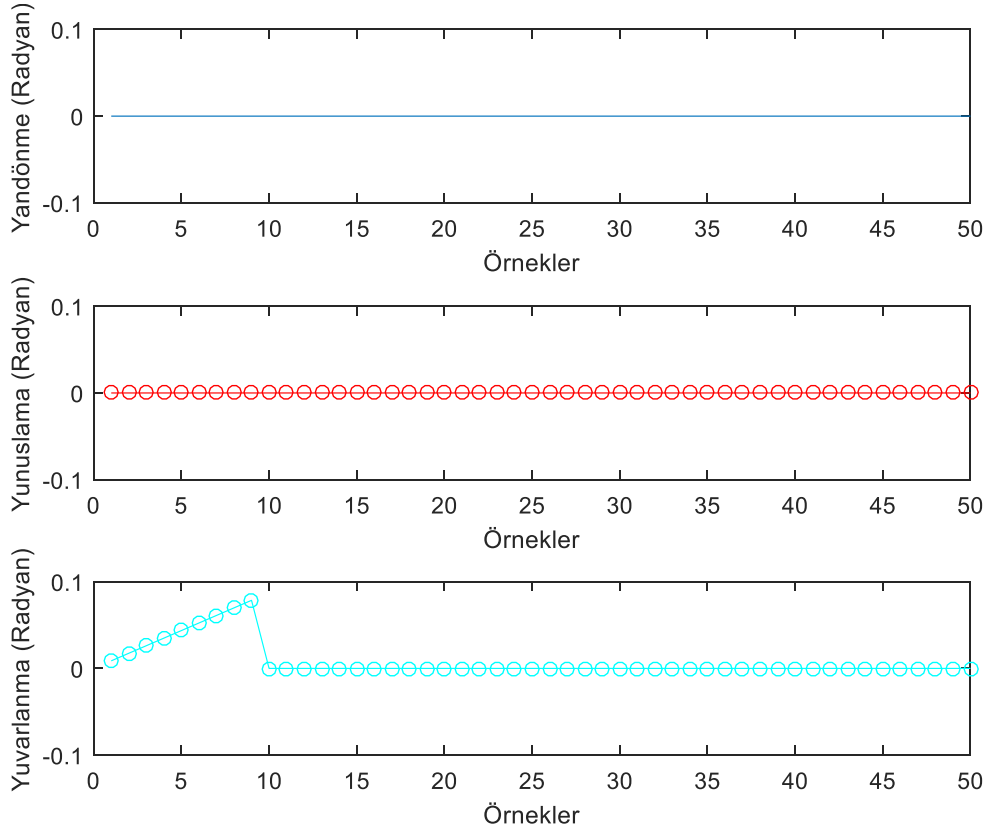


Şekil 3.17–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu–3

Pozlama süresi boyunca yapılan Şekil 3.17 ile verilen hareket sonucu ortaya çıkan bulanıklığa ait NYF' ler bazı pikseller için Şekil 3.18 ile verilmiştir.

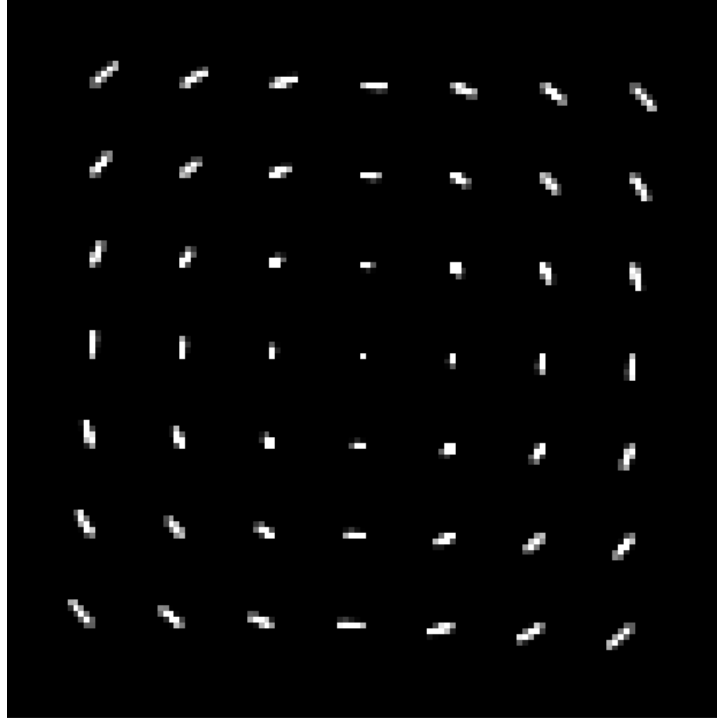


Şekil 3.18–Hareket Senaryosu–3 İçin Bazı Piksellerin Nokta Yayılım Fonksiyonları



Şekil 3.19–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu–4

Pozlama süresi boyunca yapılan Şekil 3.19 ile verilen hareket sonucu ortaya çıkan bulanıklığa ait NYF' ler bazı pikseller için Şekil 3.20 ile verilmiştir.



Şekil 3.20–Hareket Senaryosu–4 İçin Bazı Piksellerin Nokta Yayılım Fonksiyonları



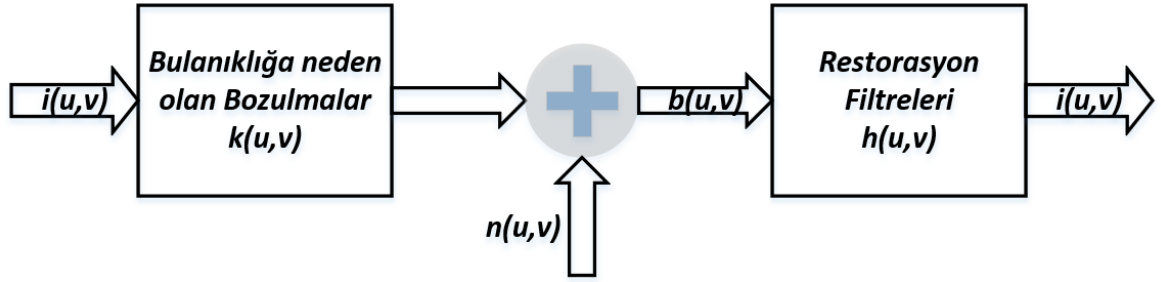
## 4. GÖRÜNTÜ NETLEŞTİRME

Görüntü netleştirme işlemi ya da bulanıklığın yok edilmesi (*İng.* deblurring) işi literatürde çoğunlukla evrişim (*İng.* convolution) işleminin tersi gibi düşünülerek dekonvolüsyon işlemi gibi yaklaşılmış ve bu çerçevede çözümler üretilmiştir. Literatürde dekonvolüsyon işlemi ikiye ayrılmaktadır. Bulanıklığa neden olan filtrenin bilindiği durum kör–olmayan dekonvolüsyon (*İng.* non–blind deconvolution), bulanıklığa neden olan filtrenin bilinmediği durum kör dekonvolüsyon (*İng.* blind deconvolution) olarak isimlendirilmektedir. Kör dekonvolüsyon işleminde de ilk aşamada bulanıklaşma filtresi bulunur ve böylece işlem yine kör olmayan dekonvolüsyon problemine indirgenir.

Görüntü bulanıklığının giderilmesiyle ilgili ilk çalışmaların 1960' lı yıllardan itibaren ortaya çıkmaya başladığı düşünülmektedir. Bu çalışmalardan en önemlilerinden biri William Hadley Richardson' ın Bayes kuramı ve koşullu olasılık ilkelerini, NYF' leri bilinen bozuk görüntülerin düzeltilmesi amacıyla kullanmasıdır [30]. Ters filtreleme (*İng.* inverse filtering), Wiener filtreleme (*İng.* Wiener filtering), en küçük kareler yöntemi (*İng.* least – squares filtering) ile filtreleme, yinelemeli Kalman filtreleme (*İng.* iterative Kalman filtering) gibi yöntemler bulanıklık gidermede yoğun olarak kullanılmakta ve bugün yapılan güncel çalışmalara temel teşkil etmektedirler [41].

Kundur ve Hatzinakos' un 1996 yılında yayınlanan çalışmaları, görüntüde bulanıklığın giderilmesi konusunda o zamana kadar yapılan çalışmaların anlatıldığı genel bir literatür taraması olarak ön plana çıkmaktadır. Problemin çözümüne yönelik literatürdeki çalışmaları sınıflandırmak gerekirse şu iki ana başlık ön plana çıkmaktadır; belirlenimci (*İng.* deterministic) yöntemler ile olasılıksal yöntemler [25]. Belirlenimci yöntem olarak, içinde rastgele ya da olasılıksal işlemlerin yer almadığı doğrudan analitik veya numerik hesaplamalarla elde edilen ters filtreleme ve en küçük kareler yöntemi sayılabilir. Rastgele dağılımlardan yararlanılan olasılıksal yöntemler ise Wiener filtreleme, yinelemeli Kalman filtre ile benzerlik fonksiyonunun maksimum yapılması yöntemleridir.

#### 4.1. Uzamsal-Değişmeyen Bulanıklığın Yok Edilmesi



Şekil 4.1–Bulanıklığın Doğrusal Sistem Olarak Modellenmesi ( [42])

Görüntü netleştirme çalışmalarında, Şekil 4.1 ile verilen doğrusal filtreleme modeli pek çok çalışma tarafından benimsenmiştir. Kamera tarafından alınan bulanık görüntü; net bir görüntü ile bir bulanıklaşma filtresinin doğrusal evrişimidir [30]. Bu yaklaşımda kamera sallantısının görüntü üzerindeki bulanıklaşma etkisi görüntünün uzamsal koordinatlarından bağımsızdır ve görüntünün her bölgesinin aynı miktarda bulanıklaştığı varsayılır. Bu yüzden bu yaklaşıma uzamsal-değişmeyen bulanıklık (*İng.* spatially invariant blurring) modeli de denildiği önceki bölümde anlatılmıştı. Bu model denklem (4.1) ile tanımlanabilir. Bu denklemdeki  $\otimes$  simgesi doğrusal evrişimi gösterir. Denklemdeki  $i$  net görüntüyü,  $k$  görüntünün bulanık görünmesini sağlayan bozucu etkileri içerisinde barındıran filtreyi,  $n$  ise görüntü üzerine eklenen gürültüyü temsil eder. Yaygın olarak bu gürültünün sıfır ortalamalı Gaussian dağılıma sahip olduğu kabul edilir.

$$b(u, v) = i(u, v) \otimes k(u, v) + n(u, v) \quad (4.1)$$

Üstteki uzamsal-değişmeyen bulanıklık modelinde net görüntünün ( $i$ ) bulunabilmesi için bulanıklaşma filtresinin ( $k$ ) bulunması gerekir. Eğer bulanıklaşma filtresi biliniyorsa net görüntü ( $i$ ) hesaplanabilir. Evrişim (*İng.* convolution) işleminin tersi bir işlem ile net görüntü bulunabilecektir. Bu işleme dekonvolüsyon denir. Uzam alanında (*İng.* domain) evrişim işlemi, Fourier (uzamsal frekans) alanında çarpma işlemine denk gelmektedir.

Şimdi bu bulanıklaşma modelinde kullanılabilecek görüntü netleştirme yöntemlerini inceleyelim. Bu yöntemler ters filtreleme, tekrarlayan en küçük kareler yöntemi ile filtreleme, Wiener filtreleme, benzerlik fonksiyonun en büyük yapılması yöntemi gibi yöntemlerdir.

#### 4.1.1. Ters Filtreleme

Ters filtreleme (*İng.* Inverse filtering) yöntemi en bilinen görüntü iyileştirme yöntemidir. Eğer denklem (4.1) Fourier alanına dönüştürülürse denklem (4.2) elde edilir. Net görüntü denklem (4.3) ile gösterildiği gibi doğrudan bulanık görüntünün bulanıklaşma filtresine bölümüyle elde edilebilir. Bu işleme ters filtreleme denir. Denklemde  $B(x, y)$  bulanık görüntüyü,  $I(x, y)$  net görüntüyü,  $K(x, y)$  bulanıklaşma filtresini,  $N(x, y)$  ise sıfır ortalamalı  $\sigma$  standart sapmalı Gaussian dağılıma sahip gürültüyü ifade eder.

$$B(x, y) = I(x, y)K(x, y) + N(x, y) \quad (4.2)$$

$$\hat{I}(x, y) = \frac{B(x, y)}{K(x, y)} \quad (4.3)$$

Denklem (4.2) ile verilen  $B(x, y)$  ifadesi denklem (4.3) ile verilen ifadede yerine yazılırsa net görüntü denklemi aşağıdaki gibi olur.

$$\hat{I}(x, y) = I(x, y) + \frac{N(x, y)}{K(x, y)} \quad (4.4)$$

Bu basit yöntem her zaman yüksek doğrulukta sonuç vermeyebilir ve kararlı şekilde çalışmayabilir. Paydada yer alan bulanıklaşma filtresiyle ilgili birtakım şartların sağlanması beklenmektedir. Denklem (4.4) ile verilen bu ifadede gürültünün bilinmediği durumlarda net görüntü tam olarak kestirilemeyebilir. Gürültü bilinse bile eğer bulanıklık filtresi sıfır veya sıfıra çok yakın değerlerden oluşuyorsa  $N(x, y)/K(x, y)$  ifadesi baskın olabilir ve kestirim sonucu büyük oranda gürültü olarak elde edilebilir. Ters filtreleme yüksek-geçiren (*İng.* high-pass) filtre gibi davranarak görüntünün kenarlarını ve görüntüdeki yapıları (*İng.* structures) güçlendirir.

#### 4.1.2. Wiener Filtreleme

Ters filtreleme yaklaşımının yüksek gürültülü görüntülerde sonuçlarının yetersiz kalması sonucunda Wiener filtreleme (*İng.* Wiener filtering) yaklaşımı ortaya çıkmıştır [43]. Buna göre net görüntüyü elde etme sürecine bulanıklaşma filtresiyle birlikte gürültünün istatistiksel karakteristiği de dahil edilir. Wiener filtreleme denklem (4.5) ile verilmiştir. Eğer görüntüdeki gürültü bilinmiyorsa Wiener filtreleme, ters filtreleme işlemine indirgenir.

$$\hat{I}(x, y) = \left[ \frac{1}{K(x, y)} \frac{|K(x, y)|^2}{|K(x, y)|^2 + S_n(x, y)/S_i(x, y)} \right] B(x, y) \quad (4.5)$$

$S_n(x, y)$  : Gürültüye ait güç spektral yoğunluğu,

$S_i(x, y)$  : Görüntüye ait güç spektral yoğunluğu.

Denklemden de anlaşılacağı gibi Wiener filtreleme yapılırken, net görüntü ve gürültüye ait güç spektral yoğunluğu (*İng.* power spectral density) bilgisine ihtiyaç vardır. Bu iki bilgiyi ayrı ayrı hesaplamak yerine doğrudan bu güç yoğunluklarının birbirine bölümü olan SNR (*İng.* signal-to-noise ratio) da kullanılabilir.

#### 4.1.3. Richardson–Lucy Yöntemi

Denklem (4.6) ile verilen Bayes kuralı görüntü netleştirmede Richardson'ın yaptığı çalışmalardan beri kullanılmaktadır. Richardson net görüntünün piksel değerlerinin Poisson dağılımına uyduğu ön kabulünü yapmıştır.

$$p(i, k | b) = p(b | i, k)p(i)p(k) \quad (4.6)$$

$p(i, k | b)$  : (*İng.* posterior) Net görüntü ile bulanıklaşma filtresi birleşik olasılık dağılımı,

$p(b | i, k)$  : (*İng.* likelihood) Gözlenen görüntüye ait benzerlik fonksiyonu olasılık dağılımı,

$p(i)$  : (*İng.* image prior) Net görüntü gradyanlarına ait istatistiksel ön bilgi,

$p(k)$  : (*İng.* blur prior) Bulanıklaşma filtresine ait istatistiksel ön bilgi.

Richardson tekrarlayan (*Ing.* iterative) bir yaklaşım içinde net görüntüyü elde etmeye çalışmıştır. Sonuçta eğer yakınsama gerçekleşiyorsa, elde edilen sonucun net görüntünün benzerlik fonksiyonunu maksimum yapan çözüm (*Ing.* maximum likelihood solution) olduğunu anlaşılmıştır. Richardson ile neredeyse aynı dönemlerde fakat ondan bağımsız şekilde bulanıklığın giderilmesi konusunda çalışan başka bir isim de L. B. Lucy' dir. Lucy de aynı şekilde net olmayan görüntüleri, tekrarlı Bayes kuramı ile koşullu olasılık hesapları yaklaşımını kullanarak, keskin hale getirmeye çalışmıştır [44]. Bu iki farklı ve bağımsız çalışmanın birbirini tamamlayan çözümler sunmasından dolayı, ortaya çıkan tekrarlayan Bayes kuramı ve koşullu olasılık temelli bulanıklık giderici veya geniş anlamıyla görüntü iyileştirici yöntem, sonradan Richardson–Lucy yöntemi olarak kabul görmüştür. Bulanıklık giderme konusunda bilgisayarlı görüde bugün ortaya çıkan pek çok güncel çalışma dahi, Richardson–Lucy yöntemini temel almaktadır.

Richardson–Lucy yöntemi bozucu etkiye ait NYF' nin bilindiği fakat gürültü hakkında çok az bilgi olduğu ya da hiç bilgi olmadığı durumlarda kullanılır. Richardson–Lucy yöntemi denklem (4.7) ile verilmiştir.

$$\hat{I}_{k+1} = \hat{I}_k \left( k * \frac{b}{k \otimes \hat{I}_k} \right) \quad (4.7)$$

$b$  : Bulanık görüntü,

$\hat{I}_k$  :  $k$ ' ninci adımdaki netleştirilmiş görüntü,

$\otimes$  : evrişim (*Ing.* convolution) operatörü,

$*$  : ilinti (*Ing.* correlation) operatörü.

#### 4.1.4. Tekrarlayan En Küçük Kareler Yöntemi

Tekrarlayan en küçük kareler (*İng.* iterative least squares (IRLS)) yöntemi de görüntü netleştirme de kullanılmıştır. Levin ve ark. 2007 yılındaki çalışmalarında görüntüleme modeli olarak denklem (4.8) ile verilen modeli benimsemişlerdi [45]. Buna göre gözlenen görüntü, net görüntü ile özel olarak kodlanmış bir açıklığın (*İng.* coded aperture) ölçeklendirilmiş hali olan filtrenin doğrusal evrişimi olarak tanımlanmaktadır.

$$b = i \otimes k \quad (4.8)$$

$b$  : Gözlenen görüntü,

$i$  : Net bozulmamış görüntü,

$k$  : Özel olarak kodlanmış açıklığın ölçeklendirilmiş hali olarak bulanıklaşma filtresi.

Denklem (4.8) ile verilen ifadede  $B$  gözlenen görüntü ile  $K$  bulanıklık filtresi bilindiği için, net görüntünün kestirilmesinde tekrarlayan en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Buna göre en küçük kareler yöntemi ile net görüntünün kestirimi denklem (4.9) ile verilmiştir.

$$\min_i \|i \otimes k - b\|^2 + \sum_n \rho(\nabla x_n) \quad (4.9)$$

Yukarıdaki denklem ile verilen ifade tekrarlayan döngü içerisinde en küçük kareler yöntemiyle net görüntü kestirimi yapılır. Bu yöntemi kullanan çalışmalardan oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır [46] [47]. Buna karşın bu yöntemle de tek bir görüntüyü netleştirmek geçen süre oldukça uzundur.

#### 4.1.5. Eniyilime Yöntemleri (*İng. Optimization*)

Bir tek bulanık görüntüyü kullanarak görüntü netleştirme çalışmalarında bulanıklık filtresi ile net görüntü aynı bulanık görüntüden kestirilir. Yani bilgi kaynağı sadece bulanık görüntüdür. Bu bilgiler dışında, kestirim aşamasında doğal net görüntü gradyanlarının belirli istatistiksel dağılımlara uyduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle dekonvolüsyon kısmında bu istatistiksel dağılımlardan faydalanılmıştır. Bulanıklaşma filtresi (*İng. kernel*) için de istatistiksel dağılımlar kullanılabilir. Böylece tekrarlayan (*İng. iterative*) bir döngü içerisinde aynı anda hem net görüntü hem de bulanıklaşma filtresi kestirilir [32].

Daha ileri çalışmalarda net görüntünün yanı sıra bulanıklaşma filtresine ait ön istatistiksel bilgiler (*İng. prior*) de kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemler ile bulanıklaşma filtresi ve net görüntü eniyilime (*İng. optimization*) işlemi sırasında net görüntü ve bulanıklaşma filtresine ait ön istatistiksel bilgiler bir kısıt olarak kullanılmaktadır. Böylece sadece benzerlik fonksiyonunu maksimum yapma yöntemi yerine, net görüntü ile bulanıklaşma filtresine ait birleşik olasılık dağılımını (*İng. a posterior distribution*) maksimum yapma yöntemi de kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem ile görüntü netleştirme yapılan çalışmalarda oldukça iyi sonuçlar alınmıştır [32].

Denklem (4.6) ile verilen Bayes kuralının negatif logaritması alınması durumunda denklem (4.10) 'ye indirgenmektedir. Shan ve ark. 'ın çalışmalarında bu haliyle enerji eniyilime denklemi olarak çözümler üretilmiştir [32].

$$\|i \otimes k - b\|_P^2 + p_i(i) + p_k(k) \quad (4.10)$$

Yukarıdaki denklemde ilk terimdeki P olarak gösterilen norm ifadesi çeşitli çalışmalarda farklı sayılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bazı çalışmalar norm-1, bazıları norm-2 seçeneklerini kullanmaktadır.

Ayrıca eniyilime işleminde düzenleme terimi (*İng.* regularization term) olarak kullanılan net görüntü ve bulanıklaşma filtresi olasılık dağılımları yerine, doğrudan bunların, denklem (4.11) ile verilen, norm ifadelerini kullanan çalışmalar da vardır [48].

$$\min_{i,k} \|i \otimes k - b\|_2^2 + \frac{\|i\|_1}{\|i\|_2} + \|k\|_1 \quad (4.11)$$

İlerleyen dönemlerde, Richardson–Lucy yöntemi geliştirilerek Bayes kuralı tabanlı dekonvolüsyon işleminde, doğal net görüntülerin gradyan (*İng.* gradients) istatistikleri kullanılmıştır [49]. Yapılan çalışmalarda çoğunlukla bu dağılımın Gaussian, Laplasyan ya da Hiper–Laplasyan olduğu varsayılmıştır. Düzgün-dağılan bulanıklık kabulüyle yapılan çalışmalardan elde edilen netleştirilmiş görüntü sonuçları işlem hızı ve kalite olarak da önemli avantajlar sağlamaktadır [50] [51].

#### 4.1.6. Varyasyonel Bayes Yöntemi

Benzerlik fonksiyonunun maksimum yapılması yöntemi bazen yanlış sonuçlara yakınsayabilmektedir. Bu nedenle olasılığı en yüksek olan çözümün kabul edilmesi yerine, olası tüm çözümleri dikkate alıp, burdan ortalama bir çözüm çıkaran bir yöntem olan varyasyonel Bayes (*İng.* variational Bayes) yaklaşımını kullanan çalışmalar vardır. Bu şekilde net görüntü ve bulanıklaşma filtresine ait birleşik olasılık dağılımı (*İng.* joint distribuiton) kestirimi işlemine varyasyonel Bayes yaklaşımını denir [52]. Fergus ve ark. bir varyasyonel Bayes çerçevesi içinde, görüntü gradyanları üzerinde doğal görüntü ön istatistik bilgilerini kullanarak tekrarlayan bir yaklaşım içinde bulanıklaşma filtresini kestiriyorlar [31]. Denklem (4.12) ile verilen Kullback-Leibler (KL) uzaklığı kullanılarak bir maliyet fonksiyonu elde ediliyor ve bu fonksiyon eniyileme şeması içinde kullanılıyor.

$$KL ( q(\nabla i) q(k) || p(\nabla i, k | \nabla b) ) \quad (4.12)$$

$q(\nabla i)$  her bir piksel için Gaussian dağılımı,  $q(k)$  her bir bulanıklık elemanı için doğrultulmuş Gaussian dağılımı ifade eder.

Karmaşık bir eniyilime şeması olan bu yöntem ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu yöntem kararlı çalışmasına ve oldukça iyi sonuçlar vermesine rağmen, ağır işlem yükü ve karmaşıklığı nedeniyle uzun işleme süresine sahiptir [31].



## 4.2. Uzamsal-Değişen Bulanıklığın Yok Edilmesi

Uzamsal değişen bulanıklığın giderilmesinde, tüm görüntü bölgesi için aynı filtre kullanılamaması nedeniyle, ters filtreleme veya Wiener filtreleme gibi yöntemler kullanılmazlar. Uzamsal-değişen bulanıklığın giderilmesinden genellikle tekrarlı eniyilime tabanlı çözümler kullanılır. Görüntüden kesilen alt görüntülere ait ve bu küçük bölge içerisinde düzgün dağılan NYF kabulü ile yapılan çalışmalar vardır. Bunlar dışında, piksel seviyesinde NYF kestiriminin yapıldığı çalışmalar da bulunmaktadır. Gerçek dünyada kamera hareketlerinin büyük bir kısmı görüntü üzerinde uzamsal-değişen bulanıklık etkisi bırakmaktadır. Görüntü netleştirme ya da bulanıklığın giderilmesi konusunda Evrişimsel Sinir Ağları (İng. convolutional neural network) ile çözümler getiren çalışmalar bulunmaktadır. Özellikle dekonvolüsyon probleminin çözümünde bu tip çalışmalar ile başarılı sonuçlar alınmıştır [53]. Uzamsal-değişen bulanıklığı yok etmek için, uzamsal-değişmeyen bulanıklığa göre görece daha az çalışma vardır.

### 4.2.1. Benzerlik Fonksiyonun En Yüksek Yapılması

Görüntü netleştirme problemi Bayes kuralı yardımıyla çözülebilmektedir. Joshi ve ark. bir AÖB yardımıyla hesapladıkları NYF'leri, Bayes kuralı çerçevesinde çalışan bir görüntü netleştirme işleminde kullanmışlardır [6]. Bu durum yukarıda uzamsal-değişmeyen bulanıklık başlığı altında da verilmişti. Gözlenen görüntü, net görüntünün bir bulanıklık filtresi yardımıyla doğrusal dönüşümü olarak denklem (3.16) ile ifade edilsin. Buna göre aşağıdaki Bayes denklemi ve logaritmasının alınmış hali yazılabilir.

$$p(i|b, k) = \frac{p(b|i)P(i)}{p(b)} \quad (4.13)$$

$$\max_i p(i|b) = \min_i [L(b|i) + L(i)] \quad (4.14)$$

Bu durumda görüntü netleştirme problemi aşağıdaki denklem (4.15) ile verilen negatif benzerlik fonksiyonu teriminin minimize edilmesine indirgenmiş oldu. Gürültü terimi  $\sigma$  standart sapmalı, sıfır ortalamalı Gaussian dağılımdır.

$$L(b|i) = \|b - ki\|^2/\sigma^2 \quad (4.15)$$

Buradaki görüntü benzerlik fonksiyonunun negatif logaritması Levin ve ark.'nın kullandıkları yöntemin aynısıdır [45]. Levin net görüntünün olasılık dağılımı olarak hiper-Laplasyan dağılım kullanmıştır ( $L(i) = \lambda \|\nabla i\|^{0.8}$ ). Enyilime yöntemi olarak tekrarlayan en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır [54].

Kamera hareketinden kaynaklı olarak bulanık alınmış bir görüntünün; kamera hareketi yörüngesi boyunca kameranın gördüğü ara görüntülerin bir ortalaması olduğunu önceki bölümde göstermiştik. Her bir ara görüntü, gerçek-net görüntünün farklı projeksiyon edilmiş homografileri olduğunu da aynı bölümde ifade etmiştik. Bu model projeksiyon edilmiş hareket yörüngesi bulanıklığı (*İng.* Projective Motion Path Blur (PMPB)) ismi ile biliniyor. Kamera hareketini uzamsal-değişen bulanıklığa sebep olacak şekilde modelleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. En bilinenleri, Whyte ve ark. ile Gupta ve ark. çalışmalarıdır. Gupta ve ark. çalışmalarında dekonvolüsyon aşamasında, daha önceki çalışmalara benzer şekilde Bayes kuralı tabanlı bir çözüm kullandılar ve aşağıdaki enerji fonksiyonunu minimize etmeye çalıştılar [39].

$$E = \left\| \left[ \sum_j a_j k_j \right] i - b \right\|^2 + \text{prior}(i) + \text{prior}(k) \quad (4.16)$$

$$k = \sum_j a_j k_j \quad (4.17)$$

Gupta ve ark. çalışmalarında 768x512 boyutunda bir görüntünün netleştirilmesinin yaklaşık 1 saat sürdüğü belirtilmiştir. Ayrıca bunun için yaklaşık 8GB 'lık bir PC gerektiği de belirtilmiş. Görüldüğü gibi tekrarlayan eniyileme yöntemleri iyi sonuç veriyorlar fakat işlem süreleri oldukça uzundur.

Whyte ve ark. kamera hareketi kaynaklı bulanıklığı sadece dönmeden kaynaklı PMPB olarak modelliyorlar [38]. Dekonvolüsyon aşamasında yine Gupta ve ark. 'ın çözümlerine benzer şekilde bir enerji fonksiyonunu minimize etmeye çalışıyorlar.

#### 4.2.2. Richardson–Lucy Yöntemi

Yukarıda açıklanan Richard–Lucy yöntemi uzamsal-değişen ve uzamsal–değişmeyen yöntemlerle kullanılabilir. Örneğin, Tai ve ark. hibrit kamera yöntemini kullanmışlardır [55]. Bir taraftan görüntü alınırken, diğer taraftan düşük çözünürlüklü video kaydı yapılmaktadır. Düşük çözünürlüklü video kaydından optik akış (*İng.* optical flow) vektörlerini kullanarak her bir piksel için NYF' ler kestirilir. Görüntü netleştirme aşamasında bu çalışmada da Bayes kuralı tabanlı eniyileme kullanılmıştır.

Yine Tai ve ark. önceden kodlanmış bir pozlama kullanarak hareket görüntüsü elde etmişlerdir. Ardından hareket homografileri kestirilir ve bu sonradan görüntü netleştirme aşamasında kullanılır. Buna göre bulanık görüntü, denklem (4.18) ile verildiği gibi belirli sayıdaki homografik dönüşümlerin toplamı şeklinde tanımlanmıştır.

$$b = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m iH_p \quad (4.18)$$

$b$  : Gözlenen–bulanık görüntü,

$i$  : Net görüntü,

$H_p$  : Homografi matrisi,

$m$  : Homografi sayısı.

Görüntü netleştirme aşamasında Richardson–Lucy yöntemini kullanmışlardır. Standart RL yöntemini, kullandıkları modele göre yeniden tasarlamışlardır.

$$i^{t+1} = i^t \times \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m E^t(H_p i) \quad (4.19)$$

Bu ifadedeki  $E^t$  terimi, kestirilen net görüntü ile hesaplanan bulanık görüntünün gözlenen gerçek görüntüye göre kalıntı hatasıdır (*İng.* residual error) ve aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$E^t = \frac{b}{\frac{1}{m} \sum_{p=1}^m i H_p} \quad (4.20)$$

Başka bir çalışmada da Dai ve ark. görüntü ön-planını (*İng.* foreground) çıkarmaya yarayan alfa kanalı görüntüsünü (*İng.* alpha-matting) kullanarak her bir piksel için uzamsal-değişen bulanıklık filtrelerini kestirdiler [56]. Uzamsal-değişen bulanıklığın giderilmesinde, bu çalışmada da uyarlanmış bir Richardson–Lucy yöntemi kullanılmıştır.

Uzamsal değişen bulanıklık durumunda, KÖ dedektörün düzgün doğrusal hareketinden dolayı sahne derinliğine bağımlı olma durumu ortaya çıkmaktadır. Fakat biz görüntüdeki derinliğin değişmediği ve sabit sahnedeki görüntü alındığını varsaydık. KÖ dedektör dönme hareketinin bulanıklığa olan etkisi derinliğe bağlı değildir. Görüntüdeki bulanıklığın büyük çoğunluğunun, KÖ dedektörün dönme hareketinden kaynaklandığı varsayılarak devam edildi.

#### 4.2.3. Tekrarlayan En Küçük Kareler Yöntemi

En küçük kareler yöntemi bulanıklaşmanın doğrusal dönüşüm olarak tanımlandığı uzamsal-değişen bulanıklık durumunda görüntü netleştirme aşamasında doğal olarak kullanılmaktadır.

$$b = ki \quad (4.21)$$

$b$  : Sütun vektörü- Gözlenen bozuk, bulanık görüntü,

$k$  : Seyrek matris- Doğrusal bulanıklaşma dönüşümü,

$i$  : Sütun vektörü- Bozulmamış, net görüntü.

Bu durumda, bilinen nümerik yöntemler kullanılarak  $b$  ve  $k$  biliniyorsa,  $i$  net görüntüsünün çözümü aşağıda denklem (4.22) ile elde edilebilir.

$$\min_i \|ki - b\|_2^2, \quad i > 0 \quad (4.22)$$

Pek çok çalışmada basit haliyle tekrarlayan en küçük kareler yöntemi kullanmak yerine, geliştirilmiş versiyonları kullanılmaktadır. Levin ve ark. çalışmalarında

kullandıkları en küçük kareler yaklaşımını kullanarak Hiper-Laplasyan görüntü ön istatistiki bilgilerini eniyilime şemasına ekleyen ve başarılı sonuçlar elde edilen çalışmalar bulunmaktadır [57]. Başka bir görüntü netleştirme çalışmasında da birincil ve ikincil renk terimleri, Hiper-Laplasyan dağılım ön istatistiki bilgileri kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle sıralı bir şekilde çözülür [47].

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Sentetik (*İng.* synthetically) olarak elde edilen bulanık görüntüler kullanarak, net görüntüler elde edilmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında MATLAB benzetimi ve FPGA uygulaması olarak doğrudan FPGA IP çekirdekleri kullanılarak Xilinx System Generator ortamında tasarlanan görüntü netleştirici algoritma ile benzetimler yapılmıştır. System Generator tasarımının bazı alt blokları Xilinx Zynq SoC taşıyan ZC702 geliştirme kartıyla gerçek zamanlı olarak test edilmiş ve bu alt blokların başarımları MATLAB ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar kapsamında tezin üçüncü bölümünde anlatılan literatürdeki bulanıklık modelleri ile dördüncü bölümde anlatılan görüntü netleştirme yöntemlerinden ters filtreleme, Wiener filtreleme ve tekrarlayan en küçük kareler yöntemi gibi algoritmalar MATLAB ile uygulanmıştır.

Wiener filtreleme algoritması doğrudan FPGA IP çekirdeklerini kullanarak RTL seviyesinde Xilinx System Generator ortamında da tasarlanmıştır. Bir algoritmanın FPGA 'de gerçek zamanlı olarak uygulanmasından önce mantıksal eleman (*İng.* logic element) kaynak tüketimi (LUT, FlipFlop, DSP48, PLL vb.), frekans ve hafıza gibi gereksinimlerin belirlenmesini kolaylaştıran ve hızlı prototipleme amacıyla kullanılan Xilinx System Generator ortamında birebir FPGA IP çekirdekleri kullanılarak tasarım yapılmıştır. Wiener filtreleme frekans alanında çalıştığı için, 2B-FFT algoritması System Generator ortamında ayrıca tasarlanmıştır. 2B-FFT tümüyle iki boyuta ayrılabilir bir algoritma olduğu için, doğrudan 1B-FFT FPGA IP çekirdekleri kullanılarak System Generator ortamında 2B-FFT işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sırasında devrik (*İng.* transpose) alınması gerekmektedir. Gerçek zamanlı görüntü işleme birimlerinde sıklıkla kullanılan SDRAM tipinde hafızalarda devrik işlemi sırasında sütun-sütun okuma veya yazma yapmak gerekmektedir. Sütun-sütun yapılan işlemler SDRAM' in doğası gereği yavaş yapılmaktadır. SDRAM satır-satır yapılan okuma veya yazma işlemleri çok daha hızlı yapılabilmektedir. 2B-FFT algoritmasındaki devrik işleminin daha verimli yapılabilmesi amacıyla yine System Generator ortamında Corner Turn Matris yöntemi FPGA iç RAM' i kullanılarak uygulanmıştır. Bu yöntemle devrik işleminin daha hızlı ve verimli şekilde uygulanabileceği görülmüştür. Tüm Wiener Filtreleme System Generator tasarımı ile benzetimler yapılmıştır. Böylece Wiener filtreleme FPGA' de uygulanmadan önce

algoritma yükü ortaya çıkarılmıştır. Ne kadar mantıksal eleman kaynak tükettiği, bir görüntünün netleştirilmesinin yaklaşık kaç milisaniye süreceği, frekansın ne olacağı, hafıza gerekliliğın kaç MB olacağı belirlenmiştir. Xilinx System Generator' dan elde edilen model sonuçları ile MATLAB sonuçları karşılaştırılmıştır.

## 5.1. Uzamsal-Değişmeyen Bulanıklık için Deneysel Çalışmalar

Bu başlık altındaki deneysel çalışmalar ters filtreleme MATLAB uygulaması ile Wiener filtrelemenin hem MATLAB hem de Xilinx System Generator uygulamasıdır.

### 5.1.1. Ters Filtreleme

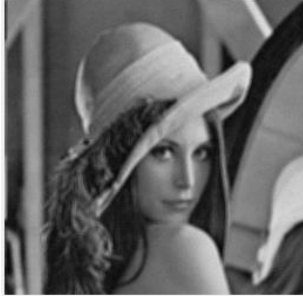

Önceki bölümde denklem (4.4) verilen Ters filtreleme işlemi MATLAB ile uygulanmıştır. Bulanık görüntüler sentetik olarak elde edilmiştir. Bulanık görüntü elde etmek için denklem (5.1) ile verilen filtre kullanılmıştır.

$$\frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Bu bulanıklaşma filtresi tersi alınmadan önce belirli bir değere eşiklendirilmiştir (*Ing. thresholding*). Böylece bu eşik değerden küçük değerler denklem (5.2)' ya göre atılmıştır.

$$K(x, y) = \begin{cases} K(x, y), & K(x, y) > n \\ n, & K(x, y) < n \end{cases} \quad (5.2)$$

Bu yöntem tersi işleminde matematiksel olarak tanımsız olan 1/0 gibi ifadelerin ortaya çıkmasını engellemiş olur. Eşikleme yapılmadan bulanıklaşma filtresinin doğrudan tersi alınırsa, 1/0 gibi tanımsız ifadeler çıkabilmektedir. Ardından  $\sigma$  standart sapma değerinde sıfır ortalamalı Gaussian gürültü eklenerek bulanık görüntü elde edilmiştir. Daha sonra bulanık görüntü ve bulanıklaşma filtresi kullanılarak ters filtreleme işlemi uygulanmıştır. Ters filtreleme sonuçları Şekil 5.3 ile verilmiştir.

$\sigma$	Bulanık ve Gürültülü Görüntü	Ters Filtrelenmiş Görüntü
0.01		
	Net görüntüye göre PSNR: 20.59	Net görüntüye göre PSNR: 23.84

Şekil 5.1–MATLAB Ters Filtreleme Sonucu







$\sigma$ : Sıfır ortalamalı Gaussian dağılıma sahip Gürültünün standart sapması

Denklem (4.4) ile verilen ters filtreleme ifadesindeki  $N(x, y)/K(x, y)$  teriminde bulanıklaşma filtresi küçük değerlerden oluşuyorsa gürültü baskın hale gelmeye başlar. Eğer bulanıklaşma filtresi denklem (5.3) ile verilen filtredeki gibi, denklem (5.1) ile verilen filtreye göre daha küçük veya sıfıra yakın değerlerden oluşuyorsa,  $N(x, y)/K(x, y)$  teriminde payda yer alan gürültü baskın hale gelir.

$$\frac{1}{49} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Ters filtreleme işleminde küçük veya sıfıra daha yakın elemanlardan oluşan bulanıklaşma filtresi kullanılması sonucu, görüntü netleştirmede gürültünün baskın hale gelmesi sonraki sayfada Şekil 5.2 ile verilmiştir. Bulanıklaşma filtresi olarak denklem (5.3) ile verilen filtresi kullanılmıştır. Ters filtreleme gürültünün yüksek olduğu görüntülerde gürültüyü görüntüden çıkarmak yerine Şekil 5.2 'de verildiği gibi daha da güçlendirebilir.

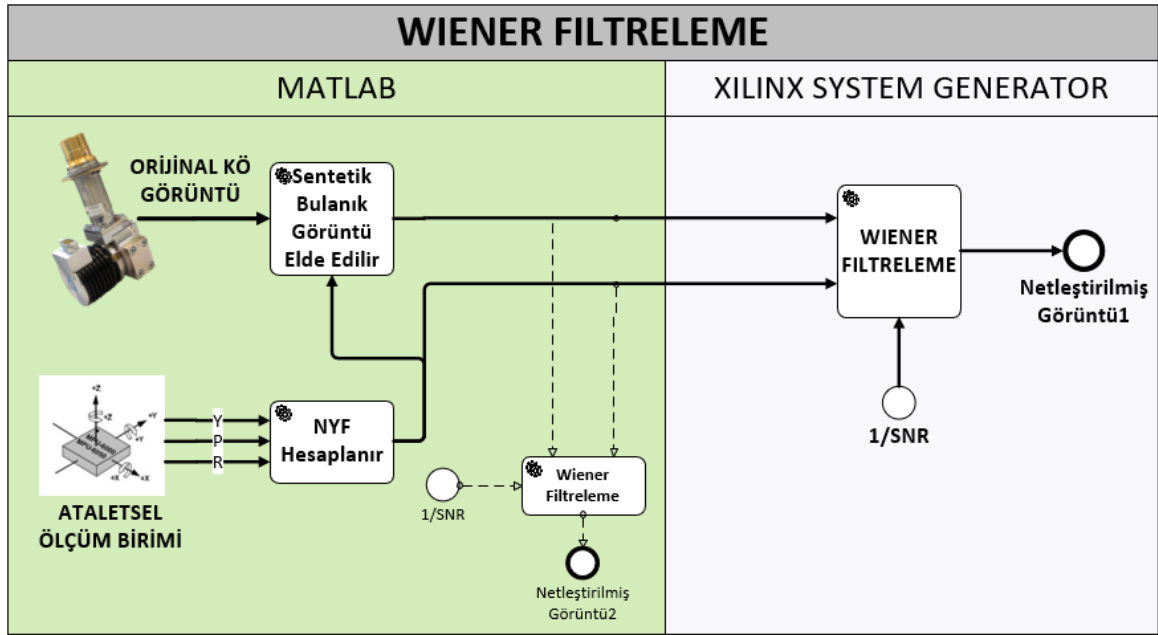


$\sigma$	Bulanık ve Gürültülü Görüntü	Ters Filtrelenmiş Görüntü
0.03		
0.05		
0.1		

Şekil 5.2–Küçük Değerli Bulanıklaşma Filtresi Durumunda Gürültünün Baskın Hale Gelmesi

### 5.1.2. Wiener Filtreleme










Wiener filtreleme deneysel çalışmalar kapsamında Şekil 5.3 ile verilen şemadaki gibi benzetimler ve System Generator FPGA tasarımı yapılmıştır. Wiener filtreleme hem MATLAB ortamında hem de doğrudan FPGA IP çekirdekleri kullanılarak Xilinx System Generator ortamında uygulanmıştır. KÖ dedektörün belirli hareket senaryoları AÖB verisi kullanılarak sentetik bulanık görüntüler MATLAB ortamında elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen sentetik görüntüler hem MATLAB ortamında hem Xilinx System Generator ortamında netleştirilmiştir.



Şekil 5.3–Wiener Filtreleme Test Şeması

#### 5.1.2.1. MATLAB Benzetimi

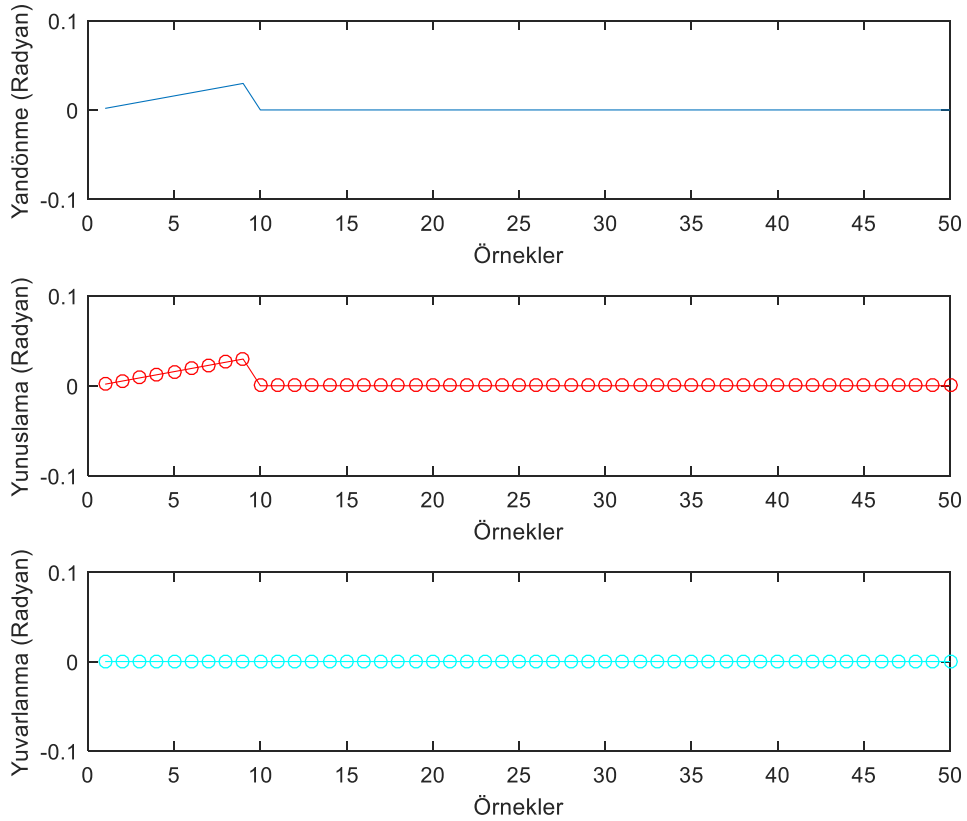
Önceki bölümde denklem (4.5) ile verilen Wiener filtreleme MATLAB ile uygulanmıştır. Belirli hareket senaryoları için AÖB verisi kullanılarak bulanıklaşma filtreleri hesaplanır. Bulanık görüntüler sentetik olarak elde edilmiştir. Ardından  $\sigma$  standart sapma değerinde sıfır ortalamalı Gaussian gürültü eklenerek bulanık görüntü elde edilmiştir. Daha sonra bulanık görüntü, bulanıklaşma filtresi ve gürültü bilgisi kullanılarak Wiener filtreleme işlemi uygulanmıştır. Wiener filtreleme tekniğinde görüntünün içerdiği gürültü de görüntü netleştirme işine dahil edilir. Bu nedenle Wiener filtreleme ile, ters filtremeye göre aynı gürültü seviyelerinde daha iyi sonuçlar alınabilmektedir.

$\sigma$	Bulanık ve Gürültülü Görüntü	Ters Filtreleme	Wiener Filtreleme
0.1			
	Net görüntüye göre PSNR: 17.30	Net görüntüye göre PSNR: 19.04	Net görüntüye göre PSNR: 22.20
0.2			
	Net görüntüye göre PSNR: 13.13 dB	Net görüntüye göre PSNR: 13.69 dB	Net görüntüye göre PSNR: 18.57 dB
0.3			
	Net görüntüye göre PSNR: 10.07 dB	Net görüntüye göre PSNR: 10.36 dB	Net görüntüye göre PSNR: 15.95 dB

Şekil 5.4–MATLAB Wiener Filtreleme Sonuçları

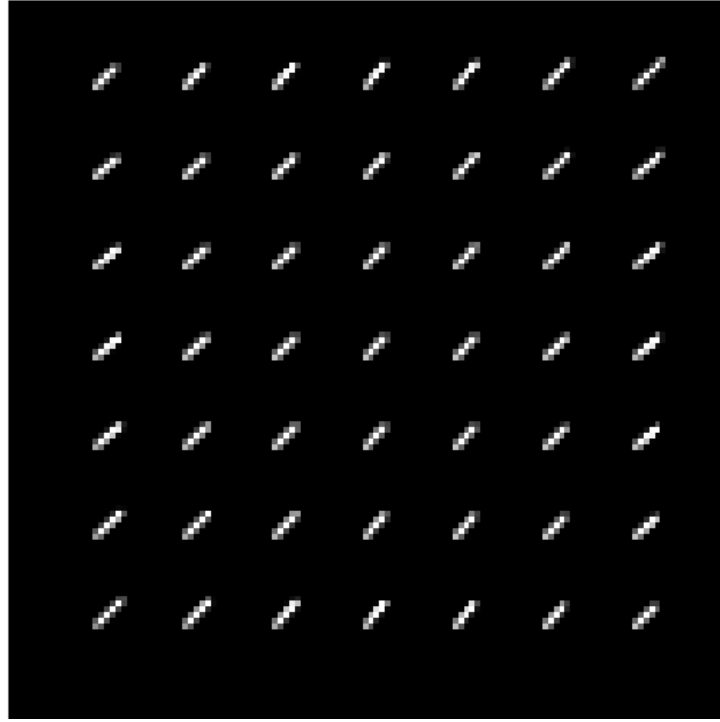
Üstteki görüntülerde bulanıklaşma filtresi olarak kullanılan denklem (5.1) ile verilen filtre kullanılmıştır. Fakat bu filtre KÖ dedektör hareketinden kaynaklı bulanıklığı değil, düzgün odaklanmadan kaynaklı bulanıklık problemini modellemede kullanılmaktadır. KÖ dedektör hareketinden kaynaklı bulanıklığı modellemek üzere kullanılacak filtre, piksel sayısı ve bulanıklığın oluştuğu yön ile tanımlanabilir. Bazı

kamera hareket senaryoları belirlenmiştir. Bu senaryoların görüntü üzerindeki bulanıklık etkileri nicel olarak, bir önceki zamanda alınmış görüntüye göre, kayan piksel sayısı ve kayma yönü olarak ifade edilebilir. Uzamsal-değişmeyen bulanıklık modelinde, bulanıklık uzamdan bağımsız olarak, tüm görüntüyü eşit miktarda etkiler kabulü vardır. Daha sonra elde edilen bulanık görüntüler, Wiener filtreleme kullanılarak hem netleştirilir hem de gürültüden arındırılır. Örneğin, KÖ dedektörün pozlama süresi boyunca Şekil 5.5 ile verilen hareketi yaptığı varsayalım.




Şekil 5.5–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu-2

Buna göre pozlama süresi boyunca, yukarıda verilen AÖB örnekleri kullanılarak BULANIKLAŞMA MODELLERİ bölümü altında anlatıldığı gibi KÖ kamera hareketine ait NYF' ler hesaplanır. Şekil 5.5 ile verilen KÖ dedektör hareket senaryosuna göre hesaplanan NYF' ler Şekil 5.6 ile verilmiştir. Bu NYF' ler gösterim amaçlıdır. NYF' ler tüm pikseller için hesaplanmaktadır.



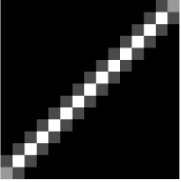


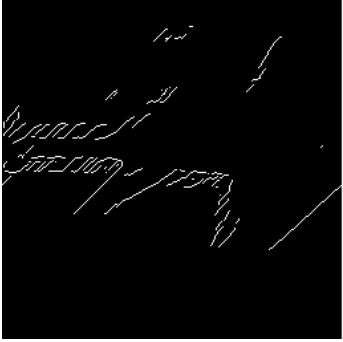



Şekil 5.6–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu–2 için NYF

Bu hareketin KÖ dedektör düzlemi içerisinde kalmış olması ve neredeyse tüm pikseller için yaklaşık olarak eşit miktarda bozulmaya sebep olmuş olması NYF' den anlaşılabilir. Buna göre görüntünün dört köşesindeki piksellerden bir tanesine ait NYF ile görüntü netleştirme testleri gerçekleştirilmiştir. Netleştirilmiş görüntünün kalitesi nicel olarak PSNR isimli metrik ile ölçülür.

Piksel / Açı	NYF	Bulanık Görüntü	Netleştirilmiş Görüntü
15 piksel. 45° yönünde			
		Net görüntüye göre PSNR : 12.5054	Net görüntüye göre PSNR : 19.3172

Şekil 5.7–Wiener Filtreleme MATLAB Benzetimi–1(Hacettepe)

Şekil 5.5 ile verilen KÖ dedektör hareket senaryosunda KÖ dedektörün aynı yönde biraz daha fazla hareket ettiği varsayılın. Aşağıdaki Şekil 5.8 ile verilen sonuçlarda KÖ dedektör görüntüsü kullanılmıştır. Görüntüye sentetik olarak bulanıklık eklenmiş ve Wiener filtreleme ile netleştirilmiştir. Sobel filtreleme ve Canny kenar çıkarma yöntemleriyle netleştirme sonucunda kenarlardaki iyileşmeler gösterilmiştir.

Piksel / Açı	NYF	Bulanık Görüntü	Netleştirilmiş Görüntü
20 piksel 45° yönünde			
		Sobel Filtre ile Kenar Çıkarma Sonucu	
			
		CANNY Kenar Çıkarma Sonucu	
			
		Net görüntüye göre PSNR : 16.4054	Net görüntüye göre PSNR : 23.8346

Şekil 5.8–Wiener Filtreleme MATLAB Benzetimi–2 (jets)

### 5.1.2.2. FPGA Tasarımı

Görüntü netleştirme yöntemlerinden hangi yöntemin gerçek zamanlı olarak uygulamaya daha uygun olduğunu incelenmiştir. Wiener filtreleme yönteminin gerçek zamanlı olarak uygulanmasına karar verilmiştir. Bu amaç doğrultusunda Xilinx System Generator aracı kullanılarak Wiener filtreleme tasarımı yapılmıştır.

GÖRÜNTÜ NETLEŞTİRME başlığı altında detaylı incelenen Wiener filtreleme tekniği aşağıda denklem (5.4) ile verilen haliyle Xilinx System Generator ortamında birebir FPGA IP çekirdekleri kullanılarak tasarlanmış ve netleştirme sonuçları farklı görüntüler için elde edilmiştir. Böylece Wiener filtreleme için gerçek zamanlı olarak FPGA donanımı üzerinde uygulamaya hazır bir RTL tasarım elde edilmiştir. Ayrıca, System Generator ortamında tasarlanan donanımın ne kadar FPGA kaynağı tükettiği de görülebilecektir. Temel görüntü işleme hafızası olarak SDRAM (İng. synchronously dynamic random access memory) tipinde hafızalar kullanılması durumunda FFT işlemi uygulamanın zorlukları incelenmiştir. CTM (Corner Turn Memory) yöntemiyle SDRAM kullanımının temel görüntü işleme operasyonu olan 2B-FFT için nasıl daha verimli hale getirildiği anlatılmıştır. Benzetimde dış hafıza birimlerinin modelleme zorluğundan dolayı FPGA' in iki girişli BRAM hafıza IP çekirdekleri kullanılmıştır.

$$\hat{I}(x, y) = \left[ \frac{1}{K(x, y) |K(x, y)|^2 + S_n(x, y)/S_i(x, y)} \right] B(x, y) \quad (5.4)$$

$\hat{I}(x, y)$  : Netleştirilmiş (bulanıklığı giderilmiş) görüntü 2B-FFT' si,

$K(x, y)$  : AÖB dönü verisi ile hesaplanan bulanıklaşma filtresi 2B-FFT' si,

$B(x, y)$  : Bulanık (gözlenen) görüntü 2B-FFT' si,

$S_n(x, y)/S_a(x, y)$  : Gürültü ve görüntü güç yoğunlukları oranı (NSR).

#### 5.1.2.2.1. Xilinx System Generator Geliştirme Aracı

Xilinx System Generator aracıyla birebir FPGA IP çekirdekleri kullanılarak RTL seviyesinde sayısal donanımlar tasarlanabilmektedir. System Generator ortamında tasarlanan sayısal donanıma ait sentezlenebilir HDL kodu üretebilir. İlgili algoritmayı FPGA' de uygulamak üzere tasarlanan sayısal donanımın FPGA kaynak tüketimi

doğrudan görülebilir. Ayrıca, FPGA tasarım aracı olan Xilinx Vivado ile eş güdümlü çalışarak tasarlanan donanım sentezlenebilir ve FPGA konfigürasyon dosyası da oluşturabilir. Xilinx System Generator aracının asıl gücü, tasarlanan donanımın MATLAB ve Simulink ile eş güdümlü olarak benzetiminin (*İng.* Simulation) yapılabilmesidir. MATLAB ve Simulink' ten girdiler alabilmekte ve işlem sonucundaki çıktıları tekrar geri verebilmektedir. Bu tez kapsamında yapılan Wiener filtreleme uygulaması Xilinx System Generator kullanılarak benzetim seviyesinde doğrulanmıştır.

#### 5.1.2.2.2. Filtreleme

Doğrusal filtreleme işleminin uygulanmasında, işlem uzam alanında (*İng.* spatial domain) yapılıyorsa iki boyutlu doğrusal evrişim (*İng.* convolution) kullanılabilir. Aynı doğrusal filtreleme işlemi frekans alanında (*İng.* frequency domain) yapılacaksa önce sayısal sinyaller DFT kullanılarak Fourier dönüşümü (*İng.* Fourier transform) ile frekans alanına dönüştürülür ve karmaşık çarpma işlemi kullanılır. Filtreleme işlemlerinin uzam alanında veya frekans alanında yapılmasını belirleyen husus, sinyalin uzunluğuna bağlı ortaya çıkan işlem karmaşıklığıdır. Sayısal sinyal işlemede algoritma karmaşıklığı tanımlanırken, büyük O gösterimi kullanılmaktadır. Buna göre 2 tane N uzunluğunda sinyalin filtreleme işlemindeki işlem karmaşıklığı; eğer doğrudan doğrusal evrişim kullanılarak yapılırsa yaklaşık olarak  $O(N^2)$ ' dir. Eğer FFT işlemi kullanılırsa işlem karmaşıklığı  $O(N \cdot \log N)$ ' dir. Buna göre sinyal uzunluğuna (N) göre FFT ya da evrişim kullanımı durumunda ne kadar çarpma/toplama işlemi yapılması gerektiği tablo Tablo 5.1 ile verilmiştir [58].

Tablo 5.1–Farklı Uzunluktaki Sayısal Sinyallerin FFT ve Doğrudan Doğrusal Evrişim ile Filtreleme İşlemlerinde Yapılacak Çarpma/Toplama İşlemi Sayıları

N	FFT	Evrişim
4	176	16
32	2560	1024
64	5888	4096
128	13,312	16,384
256	29,696	65,536
2048	311,296	4,194,304

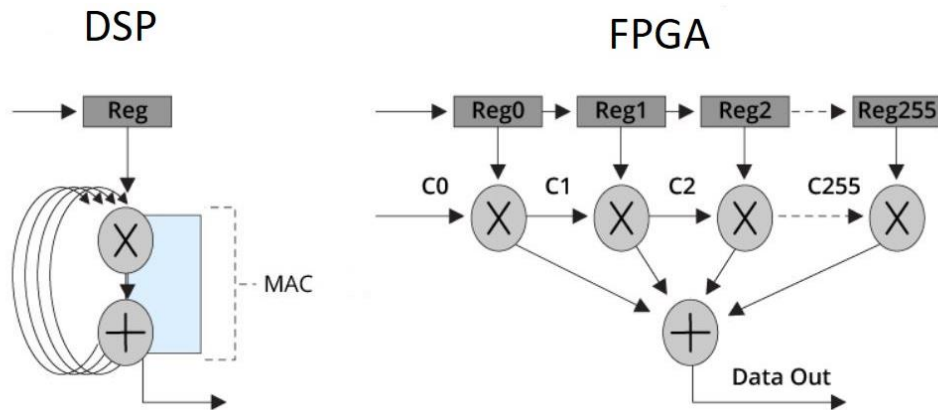


Denklem (5.4) ile verilen Wiener filtreleme işleminde, bulanıklaşma filtresi ve bulanık görüntü frekans alanında gösterilerek işlemler yapılmıştır. Buna göre, bulanıklaşma filtresinin ve bulanık görüntünün Fourier dönüşümü kullanılarak frekans alanına dönüştürülmesi gerekir. Sayısal sinyallerin Fourier dönüşümünü bilgisayar ortamında yapmak için Sayısal Fourier Dönüşümü (*İng.* Discrete Fourier Transform) kullanılır. DFT' yi daha verimli ve hızlı şekilde hesaplayan algoritmaya ise Hızlı Fourier Dönüşümü (*İng.* Fast Fourier Transform) denir.

### 5.1.2.2.3. Donanım Seçenekleri

FFT işleminin gerçek zamanlı olarak uygulanması durumunda işlem karmaşıklığı mertebesi (*İng.* Computational complexity order), hafıza kullanımı (*İng.* memory utilization) ve işlem zamanı (*İng.* computational time) gibi kritik hususlar öngörülme çalışılmıştır. FFT' nin gerçek zamanlı olarak hesaplanmasında kullanılması muhtemel olan Merkezi İşlem Birimi (*İng.* Central Processing Unit), Grafik İşlemci Birimi (*İng.* Graphical Processing Unit) ve FPGA (Field Programmable Gate Array) gibi platformlar incelenmiştir. FPGA birimlerinin sayısal sinyal işlemede sıklıkla tercih edilmesinin nedeni paralel işlem yapma kabiliyetlerinin yüksek olması ve muadillerine göre düşük güç tüketimine sahip olmasıdır.

FPGA mimarisini daha iyi anlamak üzere 256–tap bir FIR (*İng.* finite impulse response) filtrenin DSP ve FPGA mimarisindeki uygulanması Şekil 5.9 ile verilmiştir. Bu filtrenin uygulanması için standart Von Neumann mimarili bir DSP' nin 256 saat döngüsü gereklidir. Buna karşın aynı 256–tap ve aynı uzunluktaki bir FIR filtre sadece bir saat döngüsünde FPGA mimarisinde uygulanabilir. 256–tap FIR fitrenin DSP ve FPGA mimarisindeki bir uygulaması Şekil 5.9 'te verilmiştir.



Şekil 5.9–DSP ve FPGA Mimarilerinde FIR Filtre Uygulanması ( [59]' den uyarlanmıştır)

Seri bir şekilde işleyen DSP 'lerin hızları GHz mertebesinde olsa dahi, matematiksel işlem yapma yeteneğinin gerçek ölçüsü olan birim zamanda işlem uygulanan girdi örneği sayısıdır (*İng.* sample per second). Bu ölçü denklem (5.5) kullanılarak bulunabilir.

$$\text{İşlenen Örnek Sayısı} = \frac{\text{Donanım Saat Frekansı (Hz)}}{1 \text{ örnek için harcanan saat döngü sayısı}} \quad (5.5)$$

Birim zamanda işlem uygulanan girdi örneği sayısı cinsinden FPGA' in avantajı Şekil 5.9 ile verilmiştir. Bu durum genel bir DSP ile Xilinx Virtex-6 serisi bir FPGA kullanılarak sayısal örnekler ile daha da somutlaştırılabilir [66]. Saat frekansı 1.2 GHz olan bir DSP işlemcisi 2016-taplı bir FIR filtreyi, bir girdi örneği için 2016 saat döngüsünde tamamlıyor. Buna göre, bu DSP işlemcinin birim zamanda kaç tane girdi örneğine FIR filtre işlemi uygulayabileceğinin hesabı denklem (5.6) ile verilen hesaba göre 595 KSPS olarak bulunur.

$$\frac{1.2 \text{ GHz}}{2016 \text{ saat döngüsü}} = 595 \text{ KSPS} \quad (5.6)$$

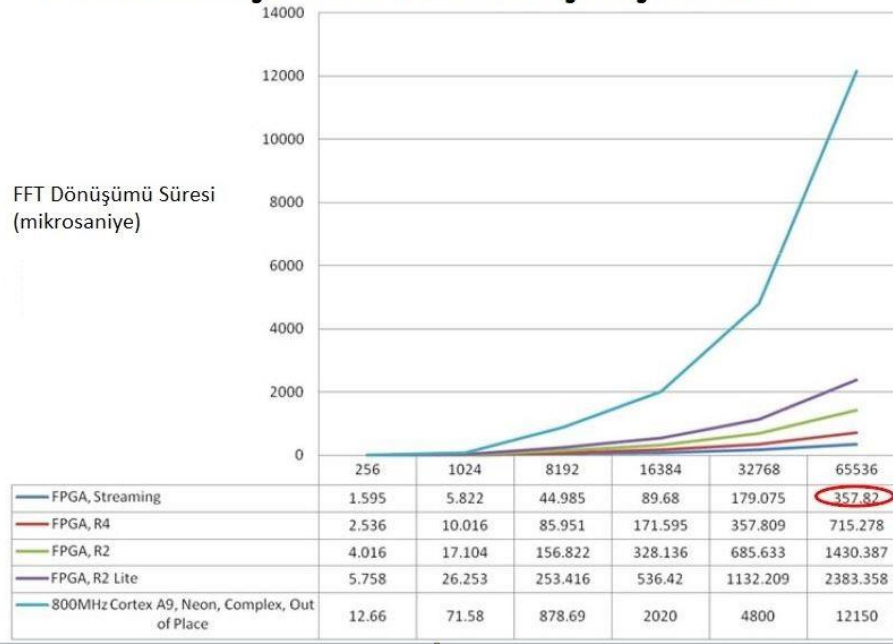
Buna karşın aynı uzunluktaki FIR filtre 300MHz FPGA ile uygulandığında, 2016–adet işlem tek bir saat döngüsünde tamamlanabilmektedir. İşlem uygulanan örnek sayısı denklem (5.7) ile verilen hesaba göre 300 MSPS olarak bulunur.

$$\frac{300 \text{ MHz}}{1 \text{ saat döngüsü}} = 300 \text{ MSPS} \quad (5.7)$$

Bu sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, FPGA mimarisi paralel işlem yapma yeteneği sayesinde DSP' lere göre avantajlı hale gelmektedir. Fakat bununla birlikte her algoritma paralel olarak işlemeye uygun olmayabilir.

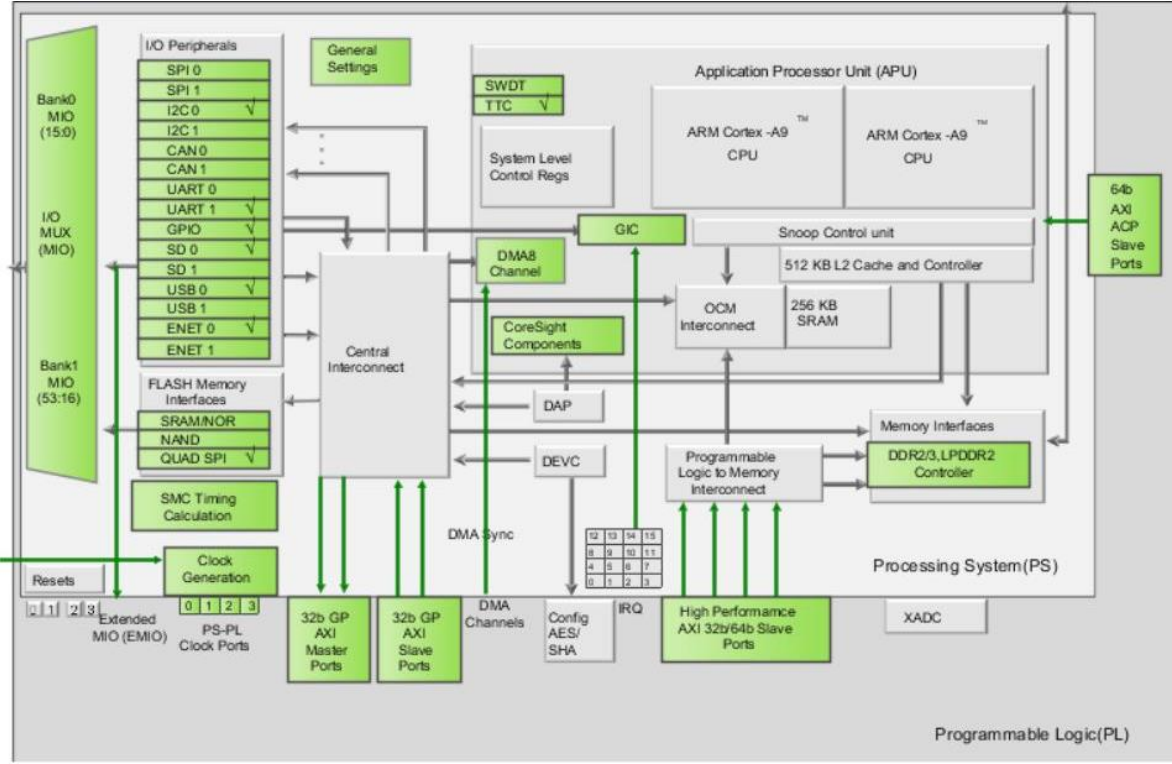
FFT dönüşümünün ARM Cortex A9 işlemcisinde ve FPGA' de uygulanması durumlarında ne kadar süre geçtiğini gösteren karşılaştırma Şekil 5.10 ile verilmiştir. Buna göre 65536 nokta FFT işlemini 800MHz' de ARM Cortex A9 işlemcisi 12.150 ms 'de yapmaktadır. Buna karşın aynı FFT işlemi FPGA ile 0.357ms sürmektedir.

## FFT Dönüşümü Süre Karşılaştırması



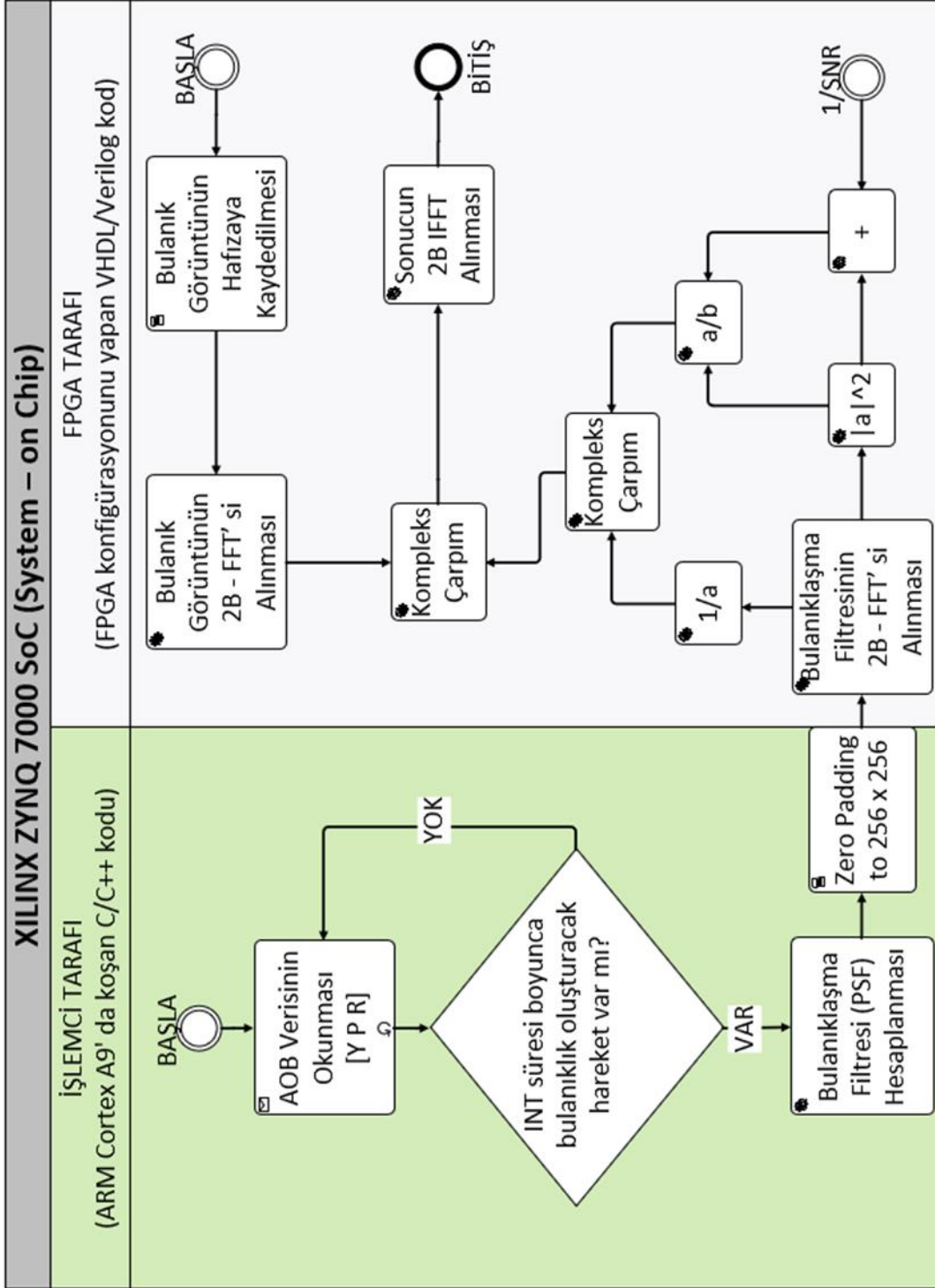
Şekil 5.10–FFT Algoritmasının 800MHz ARM Cortex A9 İşlemci ve FPGA 'de Uygulanma Durumlarında İşlem Süreleri ( [60]' den uyarlanmıştır)

Gerçek zamanlı sayısal sinyal işleme işleri için yapılan tasarımlarda bir CPU' nun yanına ek olarak çoğunlukla bir de FPGA kullanılır. Böylece FPGA, ağır işlem yükü gerektiren karmaşık operasyonlar için, asıl yazılımın koştığı CPU 'ya ek olarak, hızlandırıcı (*İng.* accelerator) amacıyla kullanılır. Bugün güncel olarak CPU ve FPGA fonksiyonlarını aynı tümleşik devre (*İng.* integrated circuit) paketi içinde birleştiren sistem entegreleri (*İng.* System-on-chip) de bulunmaktadır. Xilinx' in ZYNQ serisi SoC' leri tam olarak bu şekilde üretilmiştir. ZYNQ tümleşik devresi, 2 çekirdek ARM Cortex A9 işlemci ve bu işlemcinin dış dünya arayüzleri ile Xilinx 'in Artix veya Kintex serisi bir FPGA entegresini, aynı tümleşik devre paketi içerisinde barındırmaktadır. Xilinx' in ZYNQ serisi SoC entegreleri, sinyal- görüntü işleme ve haberleşme amaçlarıyla endüstride, otomotivde ve ayrıca askeri elektronik sistemlerde kullanılmaktadır. Asıl yazılım koştığı iki çekirdek ARM Cortex A9 işlemcisinin yanı sıra FPGA barındırması, tasarımlarda işlemcinin hız ve kapasitesinin yeterli gelmediği noktalarda ekstra paralel ve hızlı işlem yapma imkanı sunmaktadır. FPGA ve CPU arasındaki haberleşme 32-bit veya 64-bit genişliğinde AXI (*İng.* Advanced Extensible Interface) isimli protokol üzerinden sağlanır. Zynq SoC blok diyagramı Şekil 5.11 ile verilmiştir.



Şekil 5.11–Xilinx ZYNQ SoC Tümüleşik Devresi Blok Diyagramı ( [61] )

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda Xilinx ZYNQ serisi bir geliştirme kartı kullanılmıştır. Donanım ve yazılım kaynaklarına yeteneklerine göre doğru görevler verilmesi önemlidir. Bu noktada SoC ile yapılan tasarımlarda donanım ve yazılım görev paylaşımı dikkatlice yapılmalıdır. Seri işleyen ve hızlandırılması (*ing. accelerating*) gerekmeyen algoritmalar işlemcilerde uygulanırken, paralel işlenerek hızlandırılabilen algoritmalar FPGA tarafında uygulanır. KÖ dedektörün pozlama süresi boyunca AÖB' den alınan dönü verisi kullanılarak NYF' lerin hesaplanması işlemi ağır işlem yükü barındırmadığı için ARM Cortex-A9 işlemcisinde uygulanabilir seviyededir. Buna karşın, elde edilen NYF' ler ve bulanık görüntü kullanılarak yapılacak Wiener filtreleme, yani görüntü netleştirme, kısmı ağır işlem yükü ve paralel işlemeye uygun olan 2B-FFT işlemi barındırdığı için FPGA tarafında uygulanacaktır. Yazılım–donanım görev paylaşımı sonraki sayfada Şekil 5.12 ile verilmiştir.

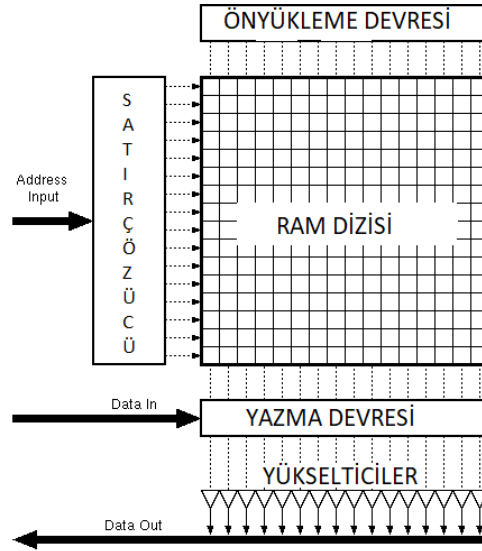


Şekil 5.12–AÖB Verisi Yardımıyla Görüntü Bulanıklığının Giderilmesi Algoritması  
Donanım–Yazılım Görev Paylaşım Şeması

#### 5.1.2.2.4. Hafıza Birimleri

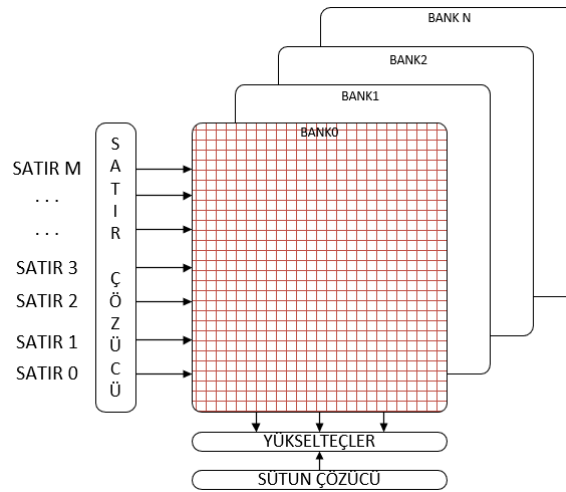
Gerçek zamanlı görüntü işleme işlerinde en önemli bloklardan biri de hafıza birimidir. Öncelikle hangi tip hafıza kullanılacağı kararlaştırılmalıdır. Bunun için işlenecek görüntü boyutu önemlidir. KÖ dedektörler çeşitli çözünürlüklerde bulunmaktadır. Özellikle soğutmalı tipteki KÖ dedektörlerin çözünürlükleri düşük çözünürlüklerden başlayarak Full HD (1920x1080) seviyesinde yüksek çözünürlüklü olabilmektedir. Örneğin 1024x1024 boyutlarında görüntü kullanılarak çalışılacaksa ve her bir piksel 16bit ile ifade ediliyorsa sadece bir tane görüntü çerçevesi (*İng.* frame)  $1024 \times 1024 \times 16 = 16\text{Mbit}$  hafızaya ihtiyaç duyar. Gerçek zamanlı görüntü işlemede işlem uygulanacak giriş görüntüsü ile işlem uygulanmış çıkış görüntülerinden birer tane yerine, işlem akışının sürekli, kesintisiz (*İng.* pipeline) ve yüksek verim için 3' er adet görüntü ile çalışılır. KÖ dedektörden gelen 3 görüntü öncelikle doğrudan hafızaya yazılır. Hafızada bu 3 görüntülük yer ayrılmış olmalıdır. Bu alana giriş görüntüsü tampon hafızası (*İng.* input frame buffer) denir. Aynı şekilde işlenmiş görüntü için de yine 3' er görüntü boyutunda yer hafızada ayrılır. Bu bölgeye de çıkış görüntüsü tampon hafızası (*İng.* output frame buffer) denir. Ayrıca görüntü işleminin ara basamaklarında çıkan görüntülerin saklanması gerekiyorsa bu görüntülerin kaplayacağı alanlarda dikkate alınır. Böylece, tek bir görüntünün en az 8–10 katı kadar hafıza gerekebilir. Bu durumda en az kullanılması gereken hafıza boyutu  $16\text{Mbit} \times 10 = 160\text{Mbit}$  olarak karşımıza çıkar. Ayrıca FFT gibi çıkışında daha fazla veri ortaya çıkan algoritmaların çıktı boyutları da düşünüldüğünde bu alandan çok daha fazla boyutta hafıza alanı gerekecektir.

Bu hafıza ihtiyacını karşılamak üzere gerçek zamanlı görüntü işleme birimlerinde iki çeşit hafıza karşımıza çıkar. Bunlar SRAM (*İng.* static random acces memory) ile SDRAM (*İng.* synchronous dynamic random access memory). SRAM yapısı Şekil 5.13 ile verilmiştir. SRAM 1 kelime (*İng.* word) boyutundaki verileri bir satır boyunca tutar. Her bir satırda birden fazla kelime tutan SRAM' ler de vardır. Her bir satıra, doğrusal şekilde artan adresler ile erişilir. Yazma ve okuma süreleri kısadır. Okuma gecikmesi SDRAM' lere göre düşüktür. Buna karşın kapasiteleri SDRAM' lere göre azdır. Her bir hücrelerinde 6 adet transistör bulunur ve bu yüzden SDRAM' lere göre de pahalıdırlar.



Şekil 5.13–SRAM Yapısı ( [62]' dan uyarlanmıştır)

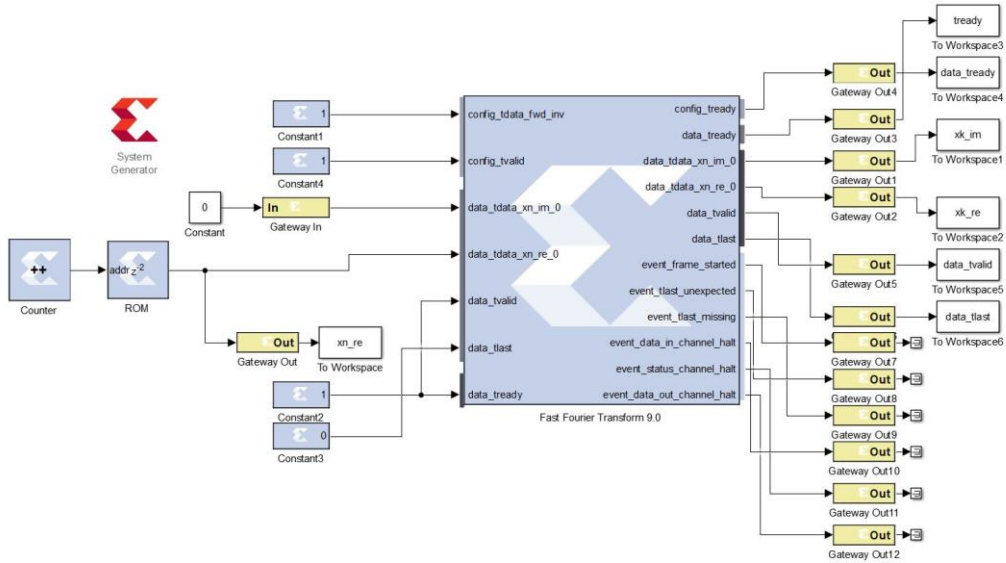
SDRAM' ler ise veriyi kondansatörlerde tutarlar. Böylece üretimlerinde daha az transistör kullanılır. Bu da SRAM' lere göre aynı boyuttaki bir çip içine daha fazla depolama alanı sunmaları anlamına gelir. Fiyatları SRAM' lere göre oldukça ucuzdur. SDRAM tipindeki hafızalarda saklanacak veri kondansatörlerde tutulduğu için, bu kapasitörlerin belirli aralıklarla yeniden şarj edilmesi gerekir. Bu işleme yenilenme (*ing.* refreshing) denir. Bu işlem boyunca da belirli bir süre geçer. SDRAM' ler bank–satır–sütun yapısındadır. Bu yapı Şekil 5.14 ile verilmiştir. SDRAM' lere veri yazma sırasında öncelikle bank seçilir ardından adresin gösterdiği satıra veri yazılır. SDRAM' lerde veri satır-satır tutulur. Buna göre, aynı satırda kalındığı sürece SDRAM' lerden yüksek performans alınır. Yazma ya da okuma durumlarında satır değiştirme olursa performans oldukça düşer.



Şekil 5.14–SDRAM Yapısı

### 5.1.2.2.5. 1B-FFT IP Çekirdeği ile ilgili Deneysel Çalışmalar

Xilinx' in sağladığı 1B-FFT IP çekirdeğine bazı başarım testleri uygulanmıştır. Bu amaçla Şekil 5.15 ile verilen System Generator tasarımı oluşturulmuştur. -1 ile 1 arasındaki 256 tane sayı dizisi System Generator ortamında tasarlanan 1B-FFT IP çekirdeğine girdi olarak verilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar MATLAB “fft” fonksiyonu ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca 1B-FFT IP çekirdeğinin C-bit doğruluk modeliyle de sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.15–Xilinx 1B-FFT IP Çekirdeği Başarım Testi için System Generator Tasarımı ( [63]’ dan uyarlanmıştır)

Şekil 5.15 ile verilen Xilinx 1B-FFT IP test tasarımından alınan sonuçlar ile aynı IP çekirdeğinin bit-doğruluk modelinden (*İng.* Bit Accurate Model (C-modeli)) elde edilen sonuçlar ve MATLAB’ ın “fft” isimli fonksiyonundan elde edilen FFT sonuçları karşılaştırılmıştır. 1B-FFT IP ayarlanan parametreler Tablo 5.2 ile verilmiştir.

Tablo 5.2–FFT IP Çekirdeği Ayarlanan Parametreler

Parametre	Ayarlanan
FFT mimarisi	Radix – 2
FFT nokta sayısı	256 nokta FFT
FFT girdi sayı tipi	İşaretili (32,31)
Ölçeklendirme ( <i>İng.</i> scaling)	FFT uzunluğu kadar ölçeklendir ( $2^8$ )



Testte kullanılan girdi veri tipi ve gösterimiyle ilgili parametreler Tablo 5.3 ile verilmiştir. Girdi veri tipi: İşaretli Sabit Nokta Gösterimi [16, 15]. Bu ifadenin anlamı herhangi bir sayı gösteriminde toplam 16-bit kullanılacağı, 15-bitin sayının ondalık kısımlarını göstermek amacıyla kullanılacağı anlaşılır. İşaretli gösterimde geriye kalan bir bit işaret bitidir.

Tablo 5.3–Testte Kullanılan Girdi Sayılarının Özellikleri

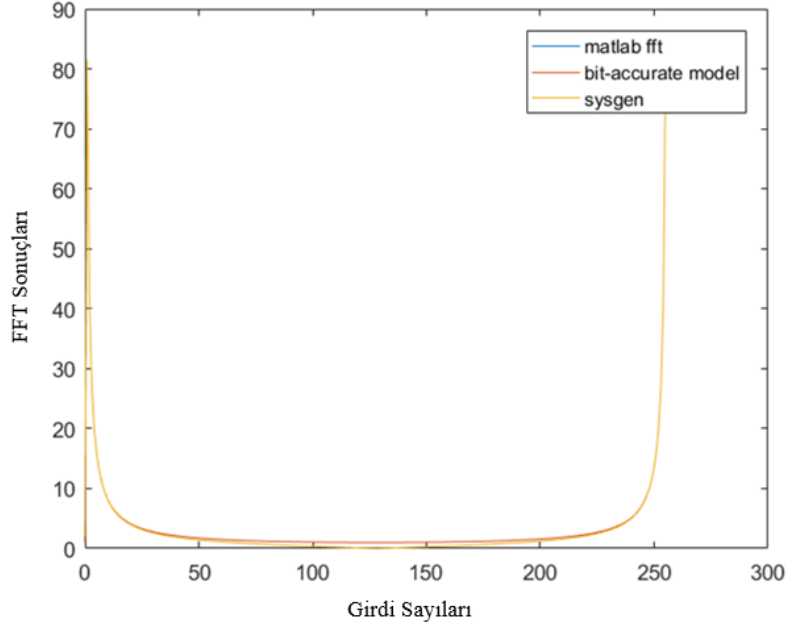
Parametre	Ayarlanan
Veri Gösterim Tipi	İşaretli Sabit Nokta Gösterimi (2' ye tümleyen gösterim)
Kullanılan Toplam Bit Uzunluğu	16-bit
Noktanın Bulunduęu Yer (Ondalık Gösterim için ayrılan bit sayısı)	15-bit
İşaret Biti	1-bit
�stten tařma (ing. Overflow) durumunda yuvarlama yöntemi	En yüksek değeri ata (İng. Saturate)
Gösterilebilen en k��uk ve en büyük sayı limitleri	[-1,1)
Gösterim �z�n�rl�ę� (İng. step size)	$2^{-15}$

Tablo 5.3 ile verilen özelliklere sahip 256–adet sayı sırayla Şekil 5.15 ile verilen Xilinx 1B-FFT IP  ekirdeęi System Generator test tasarımına, MATLAB' ın kendi fonksiyonu “fft” ‘ye ve Xilinx 1B-FFT IP  ekirdeęinin bit–doğruluk C modeline girdi olarak verildiler. 256 adet bu sayı dizisine her    durumda da 256-nokta FFT işlemi uygulandı. Bazı sayılar için elde edilen sonuçlar Tablo 5.4 ile verilmiştir.

Tablo 5.4–Xilinx 1B-FFT System Generator Tasarımı, IP ‘nin Bit-Doğruluk C Modeli ve MATLAB “fft” Fonksiyonu FFT Sonuçları

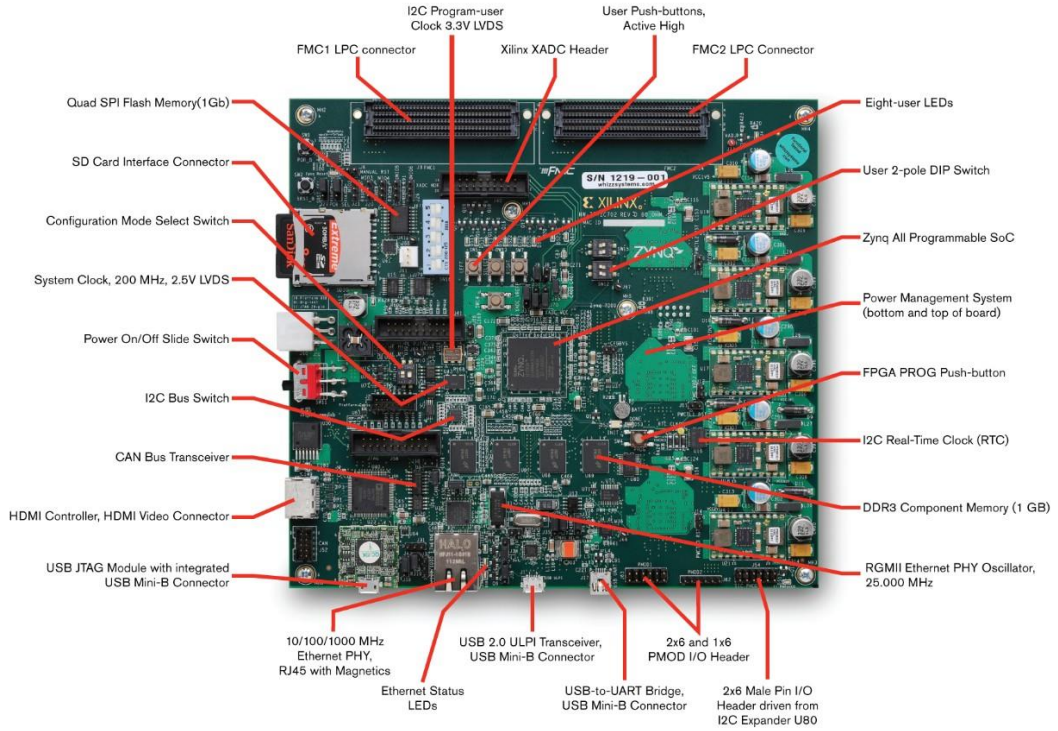
Sıra X[k]	Girdi	MATLAB “fft” fonksiyonu sonucu	Xilinx 1B-FFT IP Çekirdeği Bit – doğruluk C- modeli sonucu	Xilinx 1B-FFT IP Çekirdeği System Generator Test Tasarımı Sonucu
0	-1	1.000000	1.000000	1.992188
1	-0,9921875000000000	81.489376	81.489504	81.483460
2	-0,9843750000000000	40.747756	40.747746	40.735596
3	-0,9765625000000000	27.168581	27.168709	27.150331
4	-0,9687500000000000	20.380016	20.380048	20.355531
5	-0,9609375000000000	16.307697	16.307667	16.276888
6	-0,9531250000000000	13.593501	13.593534	13.556551
7	-0,9453125000000000	11.655377	11.655313	11.612307
8	-0,9375000000000000	10.202297	10.202295	10.153201
9	-0,9296875000000000	9.072582	9.072553	9.017032
...		...	...	...
...		...	...	...
253	0,9765625000000000	27.168581	27.168709	27.150087
254	0,9843750000000000	40.747756	40.747746	40.735688
255	0,9921875000000000	81.489376	81.489504	81.483551

256–tane sayı için bu üç farklı yöntemle elde edilen FFT sonuçları karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi System Generator FFT IP çekirdeği sonuçları MATLAB “fft” fonksiyonu sonuçlarına oldukça yakındır. Her üç durum için elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 5.16 ile verilmiştir.



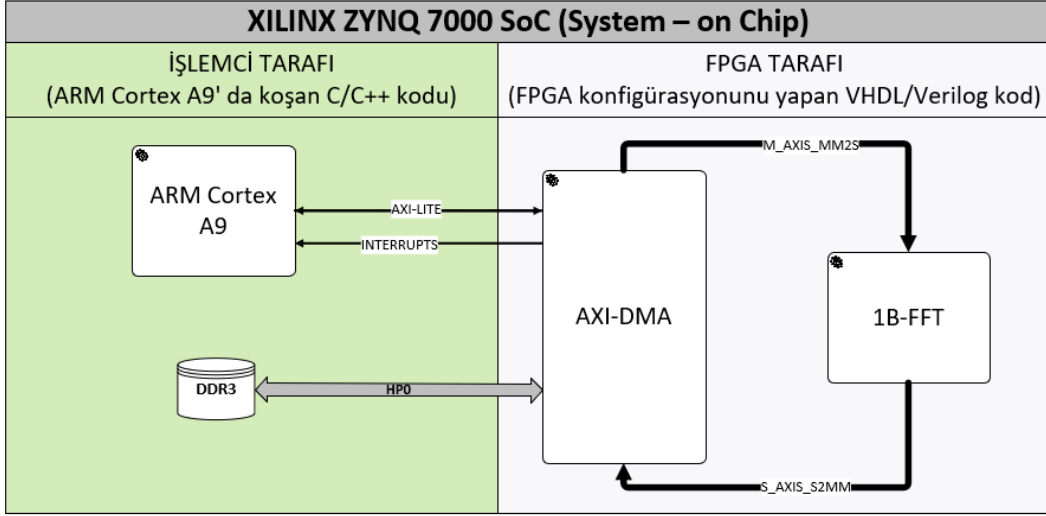
Şekil 5.16–Xilinx 1B-FFT System Generator Tasarımı, IP 'nin Bit-Doğruluk C Modeli ve MATLAB “*fft*” fonksiyonu Karşılaştırılması

Xilinx' in 1B–FFT IP çekirdeğinin gerçek zamanlı olarak FPGA üzerindeki başarımı test edilmiştir. Bu amaçla Şekil 5.17 ile verilen Xilinx ZC702 geliştirme kartıyla gerçek zamanlı 1B–FFT hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 5.17–Xilinx ZC702 Geliştirme Kartı ( [64])

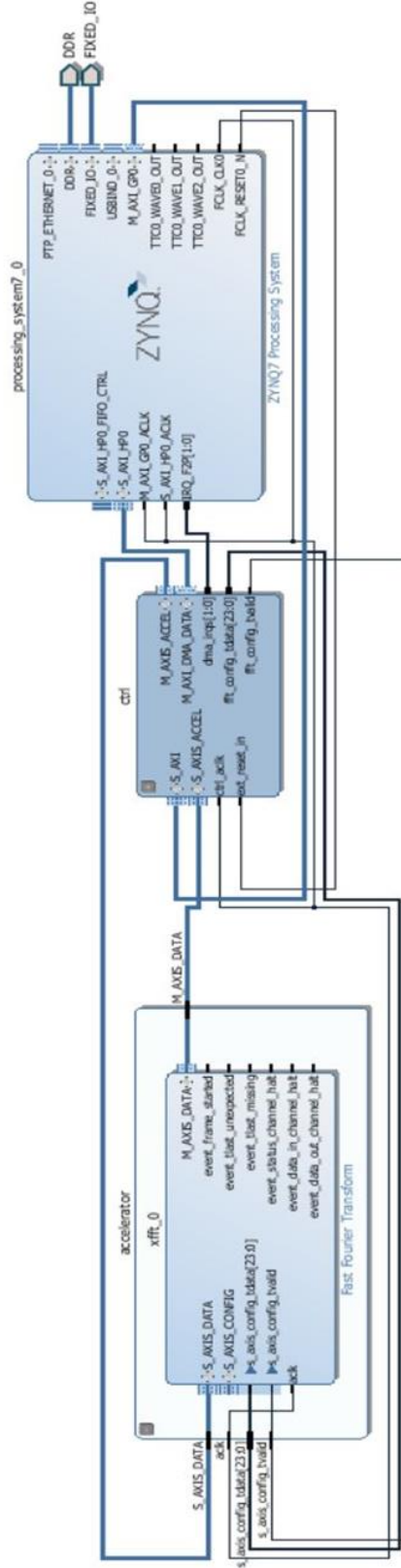
1B-FFT işleminin gerçek zamanlı hesaplanmasında kullanılan FPGA tasarımının blok diyagramı Şekil 5.18 ile verilmiştir.



Şekil 5.18–1B-FFT' nin Gerçek Zamanlı Hesaplanması için Zynq 7000 SoC Tasarımı Blok Diyagramı

Blok şemada görüldüğü gibi Xilinx Zynq SoC tasarımı İşlemci Sistemi (İng. Processing System (PS)) ve Programlanabilir Mantık (İng. Programmable Logic (PL)) olarak iki fonksiyonel kısımdan oluşur. PS tarafı Şekil 5.11 ile gösterildiği gibi iki çekirdek ARM Cortex A9, hafıza kontrolcülerini ve haberleşme kontrolcülerini ile diğer çevresel birimlerden oluşur. Xilinx ZYNQ SoC' nin PS tarafının konfigürasyonu HDL kullanılarak yeniden yapılamaz. PS tarafındaki işlemci ve arayüz kontrolcülerini gibi donanımlar sabit kodlanmış (İng. hard coded) IP' lerdir. Buna karşın ZYNQ SoC' nin PL tarafının konfigürasyonu HDL kullanılarak yeniden yapılabilir. PL tarafı Xilinx 7 serisi bir FPGA barındırır. ZYNQ SoC çipindeki PS tarafı ile PL tarafının haberleşmesi AXI (Advanced eXtensible Interface) arayüzü üzerinden gerçekleşir. AXI arayüzünün birden fazla çeşidi vardır. AXI-Lite, PS tarafından PL tarafını kontrol yazmaçlarına (İng. control register) yazmak ve durum yazmaçlarını (İng. status register) okumak amacıyla kullanılır. AXI-Stream görüntü ve video gibi hızlı veri akışlarında kullanılır. AXI-MM hafıza arayüzlerinde kullanılır.

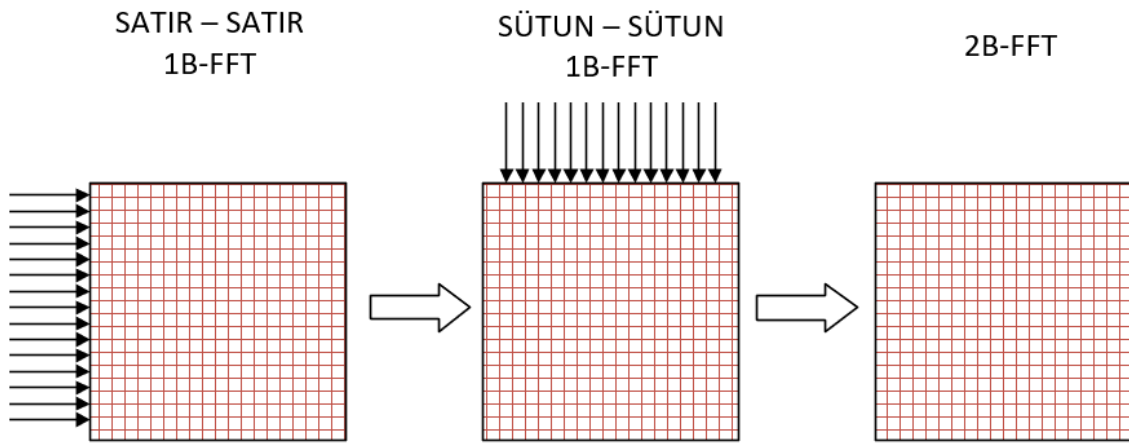
Şekil 5.19 ile verilen FPGA tasarımında görüldüğü gibi 1B-FFT IP çekirdeğine görüntü verisinin yüksek hızda girdiği arayüz AXI-Stream (M\_AXIS\_MM2S) arayüzüdür. IP çekirdeğine giren görüntü verisine 1B-FFT işlemi uygulandıktan sonra FFT sonucu yine yüksek hızlı şekilde AXI-Stream (S\_AXIS\_S2MM) arayüzünden tekrar hafızaya yazılır. 1B-FFT işleminde veriyi hafızadan okuyup 1B-FFT IP çekirdeğine verme ve IP çekirdeğinden çıkan sonuçları almak üzere bir Doğrudan Hafıza Erişimi (İng. Direct Memory Access (DMA)) IP çekirdeği kullanılır. ARM işlemcide koşan C/C++ yazılımı, AXI-Lite üzerinden bu IP çekirdeklerini kontrol eder ve durum bilgilerini alır. Gerçek zamanlı 1B-FFT sonuçları bir yazılım aracılığıyla bilgisayar ekranına bastırılmış ve sonuçlar MATLAB ile karşılaştırılmıştır. Xilinx Zynq SoC kullanılarak FPGA tarafında uygulanan gerçek zamanlı 1B-FFT sonuçlarına burada ayrıca yer verilmemiştir. 1B-FFT' nin gerçek zamanlı hesaplanması için kullanılan Xilinx Vivado tasarımına ait blok diyagram Şekil 5.19 ile verilmiştir.



Şekil 5.19-Gerçek zamanlı olarak 1B FFT IP Çekirdeğinin Performans Testlerinde Kullanılan Xilinx ZYNQ SoC FPGA Tasarımı Blok Şeması ( [65])

### 5.1.2.2.6. 1B-FFT IP Çekirdeği Kullanılarak 2B-FFT Tasarımı

Wiener filtreleme denklemi frekans alanında (İng. Frequency domain) uygulanmıştır. Bu nedenle öncelikle, System Generator Ortamında 2B-FFT IP çekirdeğinin tasarlanması gerekmektedir. Xilinx System Generator ortamında Xilinx' in sağladığı 1B-FFT IP çekirdeği kullanılarak 2B-FFT elde edilmiştir. 2B-FFT işleminin doğrusal ve tamamen ayrılabilir olması nedeniyle 2B-FFT elde etmek için önce satır-satır 1B-FFT işlemi uygulanır. Ardından sonuca sütun-sütun 1B-FFT işlemi uygulanarak, sonuçta tüm görüntüye 2B-FFT işlemi uygulanmış olur. Bu işlem Şekil 5.20 ile verilmiştir.



Şekil 5.20–2 kez 1B-FFT Kullanarak 2B-FFT Elde Edilmesi

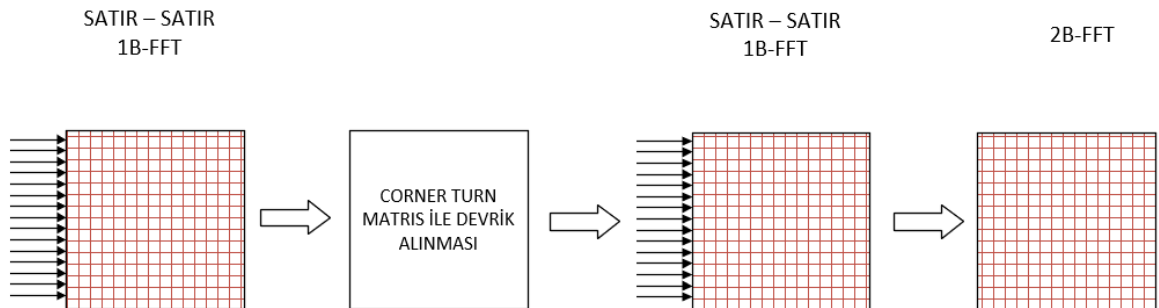
Bu işlem gerçek zamanlı olarak şu sırayla uygulanır; öncelikle görüntü satır-satır olarak SDRAM hafızaya yazılır. Hafızadaki görüntüye satır-satır 1B-FFT işlemine tabi tutulur ve sonuçlar tekrar sütun-sütun olarak hafızaya yazılır. Bu işlem görüntünün hafıza içinde devriği (İng. transpose) alınmasına eşdeğerdir. 1B-FFT' nin ardından görüntü yine satır-satır yazılabilir. Bu durumda devrik işleminin ayrıca uygulanması gerekir. Her iki durumda da sütun-sütun yazma/okuma işleminde farklı satırlardaki alanlara veri yazılıp/okunacağı için SDRAM hafızanın bu noktada verimi oldukça düşer. Bu düşüş tüm görüntü işleme akışının genel hızını düşürecek seviyelerde olabilir. Bu nokta tüm akış için bir darboğazdır (İng. bottleneck). Bu yüzden bir hafızadaki görüntünün devriğinin alınması işlemi gerçek zamanlı çalışan sinyal işleme birimlerinde oldukça uzun sürebilmektedir. Bu problemin çözümünde “Corner Turn Matris” yöntemi ile devrik işlemi daha hızlı ve verimli olarak yapılabilmektedir.

### 5.1.2.2.7. Corner Turn Memory Yöntemiyle Devrik Alınması

Bir önceki başlık altında anlatılan 2B-FFT elde etme işleminde SDRAM hafızalarda doğrudan devrik alma işlemi oldukça uzun sürebilmektedir. SDRAM hafızalarda yazma ya da okuma işleminden önce, satır adresi seçilmesi ya da aktifleşmesi (İng. Activate) gerekir. Yazma / okuma işleminden sonra ya da satır adresi değiştiğinde SDRAM hafızanın yenilenmesi ya da yeniden yüklenmesi (İng. Pre-charge) gerekir. Eğer doğrudan devrik alma işlemi uygulanırsa, SDRAM hafıza da görüntünün sütun-sütun okunması gerekeceğinden, her satır adresi değiştiğinde SDRAM' in ilgili satır adresini seçmesi ve kendini yenilemesi işlemi nedeniyle verimi oldukça düşürecektir. Bu da sütun-sütun okuma hızını oldukça düşürecektir.

Matris devriği alınması temel doğrusal cebir işlemlerinden biridir. Gerçek zamanlı sinyal işleme birimlerinde matris devriği alınması işlemi sıklıkla kullanılır. SDRAM hafızalar kullanılarak yapılan doğrudan devrik alma işleminde yazma ile okuma arasındaki hız farklılığı sebebiyle, devrik alınması sırasında tüm görüntü işleme akışının hızını düşmektedir. SDRAM' in doğası gereği, doğrudan devrik işlemi için yapılacak olan satır-satır yazma ve sütun-sütun okuma ya da sütun-sütun yazma ve satır-satır okuma yöntemlerinden her biri kendi içinde ciddi anlamda hız uyumsuzluğu problemi barındırır. SDRAM için darboğaz olan nokta sütun-sütun okuma ya da yazmadır. Eğer SDRAM için satır ve sütun işlemleri arasındaki hız farkı kapatılabilirse ve hatta eşitlenebilirse, devrik işlemi tüm görüntü işleme akışını yavaşlatmayacaktır.

Corner Turn Matris yöntemiyle devrik alınarak 2B-FFT elde edilmesi Şekil 5.21 ile verilmiştir.



Şekil 5.21–Corner Turn Matris Yöntemiyle Devrik Alınarak 2B-FFT Elde Edilmesi



Tablo 5.5 devrik işleminin doğrudan alınması ve Corner Turn Matris yöntemiyle alınması durumunda SDRAM hafızadan okuma ve yazma hızlarının kaç saat döngüsü sürdüğünü göstermektedir. Buna göre CTM yöntemiyle okuma hızı, doğrudan okuma hızına göre en az 9 kat artmaktadır.

Tablo 5.5–Matris Devrik Alma İşleminde Farklı Yöntemler için Geçen Süreleri ([66])

	Doğrudan Devrik Alma Algoritması	Blok CTM Algoritması ile Devrik Alma			
		P=16 Q=256	P=32 Q=128	P=64 Q=64	P=128 Q=32
Bir görüntünün yazılması için geçen saat söngüsü	16,125M	24M	20M	18M	17M
Bir görüntünün okunması için geçen saat döngüsü	144M	18M	20M	24M	32M

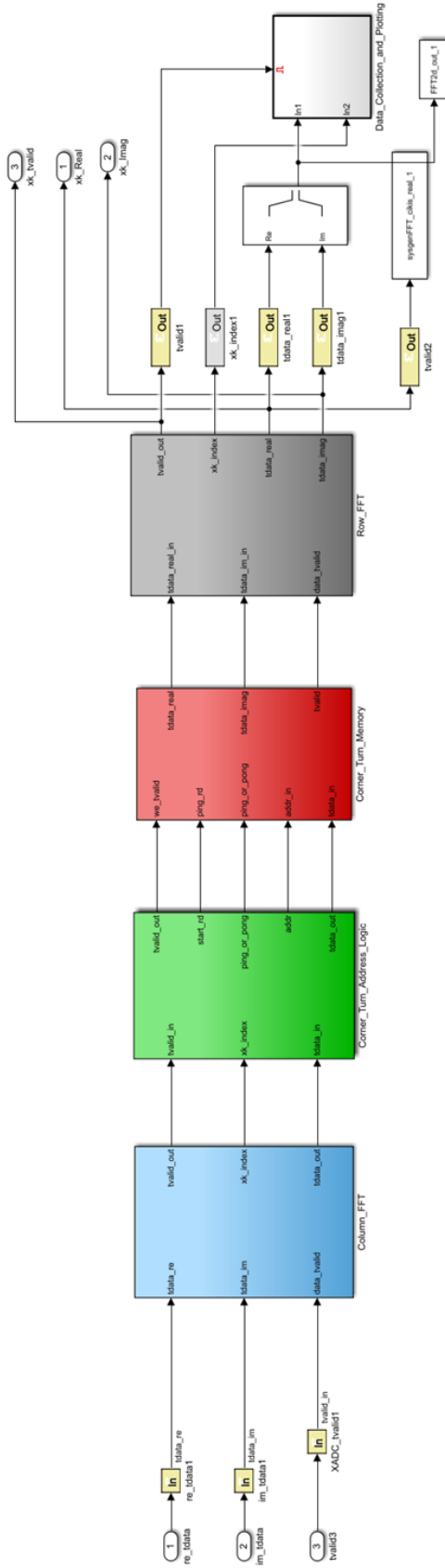
SDRAM' in daha az sayıda satır adresi seçmesi için, birinci 1B-FFT' nin ardından aynı sütundaki piksellerin hafızada aynı satırda tutulacak şekilde yerleştirilmesi gereklidir. Bu nedenle, 1B-FFT' nin ardından devrik işlemini gerçekleştirmek üzere her bir yazma/okumada yeni bir adres üretmek üzere adres üretici ile piksel verilerini SDRAM hafızaya belirtilen şekilde yerleştirmek üzere ara tampon belleklere ihtiyaç duyulacaktır. Bu belleklere “ping-pong” hafıza da denir. 2B-FFT almak amacıyla Corner Turn Matris yöntemiyle devrik alınması işlemi için adres üretici ve ping-pong hafıza gibi mantık devreleri Xilinx System Generator' daki ile referans tasarım kullanılmıştır. Benzetimlerde SDRAM gibi dış hafızanın modelleme güçlüğü nedeniyle, FPGA iç Blok RAM 'i kullanılarak CTM uygulanmıştır.

2B–FFT işlemi için Xilinx IP çekirdeklerinin modellerini kullanarak System Generator aracıyla benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimlerde iki 1B–FFT arasındaki devrik alma işlemlerinde Corner Turn Memory (CTM) yöntemi uygulanmıştır. Sadece bir tane 2B–FFT işlemi için kullanılan System Generator tasarımı Şekil 5.22 ile gösterilmiştir. Gerçek zamanlı çalışan ürünlerin ortaya çıkarılmasındaki zaman kısıtından dolayı Xilinx System Generator gibi bir araç oldukça faydalıdır. Hızlı prototipleme (*İng.* rapid prototyping) ve doğrudan FPGA bloklarıyla benzetim yapıldığı için, detaylı bir benzetim yapabilme imkanını sunmaktadır. Wiener filtrelemenin gerçek zamanlı uygulamasında en önemli aşama olan 1B–FFT blokları kullanılarak 2B–FFT işleminin uygulanmasıdır. Bu işlem doğrudan FPGA blokları kullanılarak Xilinx System Generator kullanılarak uygulanmıştır.

Şekil 5.25 ile verilen tasarım üç aşama ile System Generator’ de modellenmiş ve Xilinx FPGA IP’ leri kullanılarak benzetimleri yapılmıştır. Buna göre ilk aşama, bulanık görüntüye ve bulanıklaşma filtresine 256-nokta 2B–FFT işlemi uygulanması ve çıkan sonuçların ölçeklendirilmesidir. (*İng.*Scaling). İlk aşama ile verilmiştir. İkinci aşama, bulanık görüntü ve bulanıklaşma filtresi çıktılarının karmaşık çarpım işlemine tabi tutulması ve çıkan sonuçların [-1 1] arasına ölçeklendirilmesidir. Üçüncü aşama ise karmaşık çarpım sonucuna 256–nokta 2B–IFFT işlemi uygulanması ve çıkan sonucun ölçeklendirilmesidir.

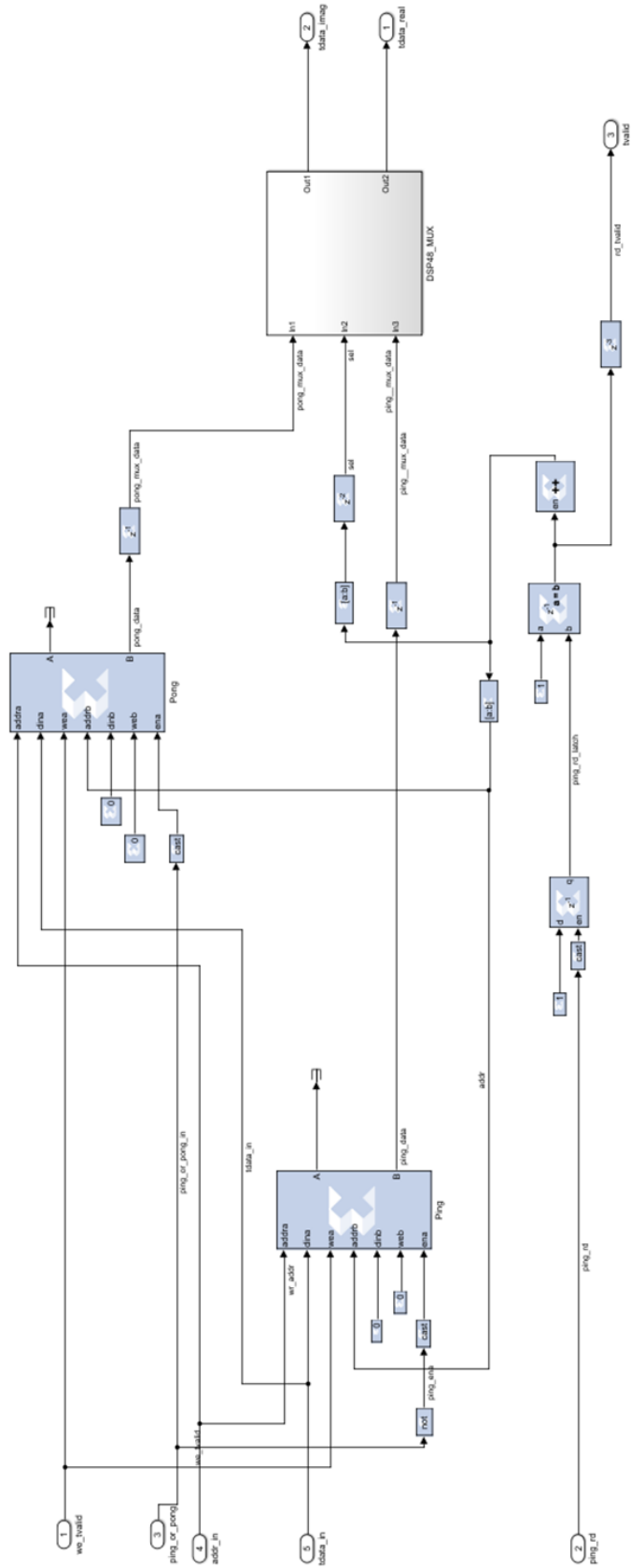
$$\hat{I}(x, y) = \left[ \frac{1}{K(x, y) |K(x, y)|^2 + S_n(x, y)/S_i(x, y)} \right] B(x, y) \quad (5.8)$$

BULANIKLAŞMA MODELLERİ başlığı altında detaylı incelenen yukarıdaki denkleme göre aşağıdaki algoritma akış şeması çıkarılmıştır. Tüm aritmetik işlemlerde FPGA mimarisinin uygun olduğunu sabit–nokta gösterimi (*İng.* fixed–point representation) kullanılmıştır. Wiener filtreleme Xilinx System Generator tasarımı, Şekil 5.26 ile verilen detaylı algoritma akış şemasına göre oluşturulmuştur. 256–nokta 2B–FFT algoritmasının System Generator ortamındaki benzetimlerde yaklaşık 196K saat döngüsü sürdüğü görülmüştür. 150MHz olarak seçilen tasarım saat frekansı ile 256-nokta 2B–FFT işleminin yaklaşık 1,3ms süreceği hesaplanmıştır.

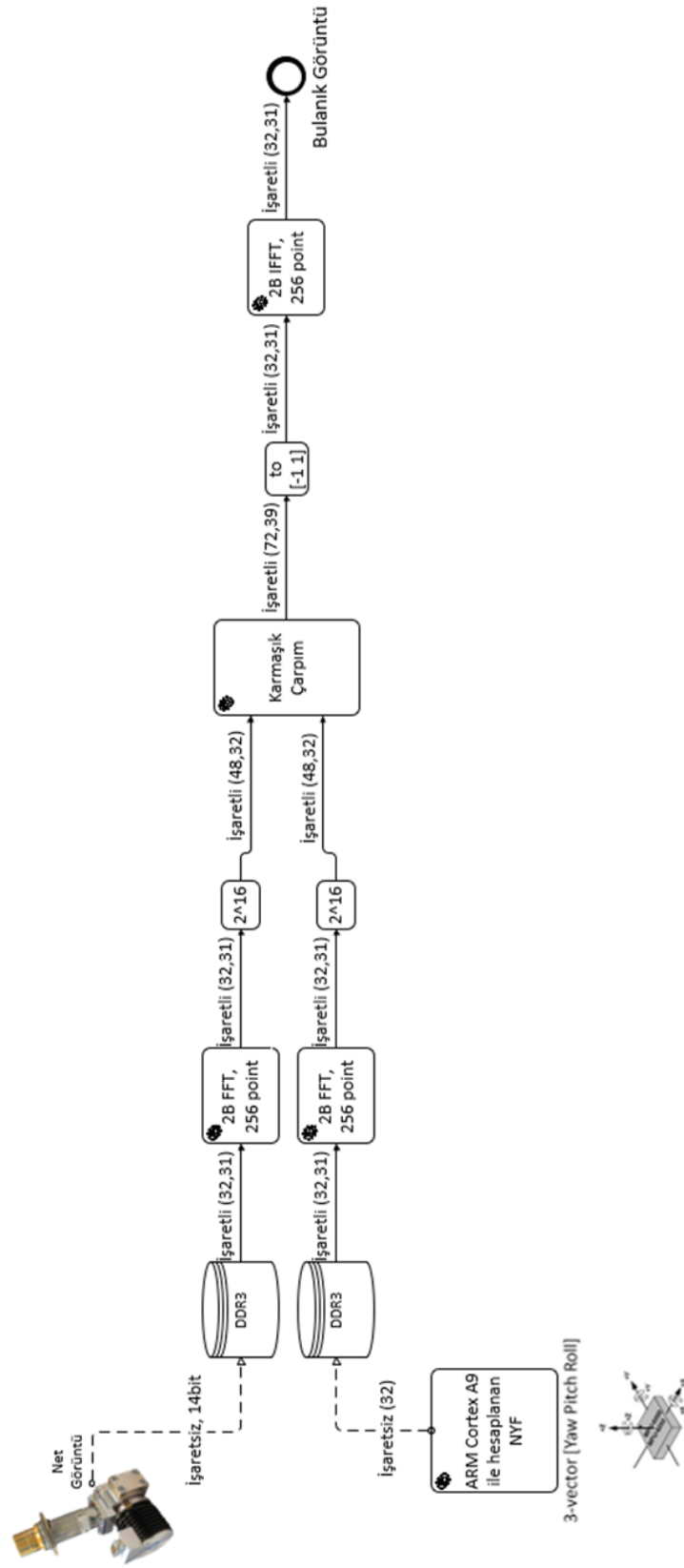


Şekil 5.22-2B-FFT System Generator Tasarımı: İki tane 1B-FFT işlemi ve Corner Turn Matris Yöntemiyle Devrik Alınması için System Generator Tasarımı

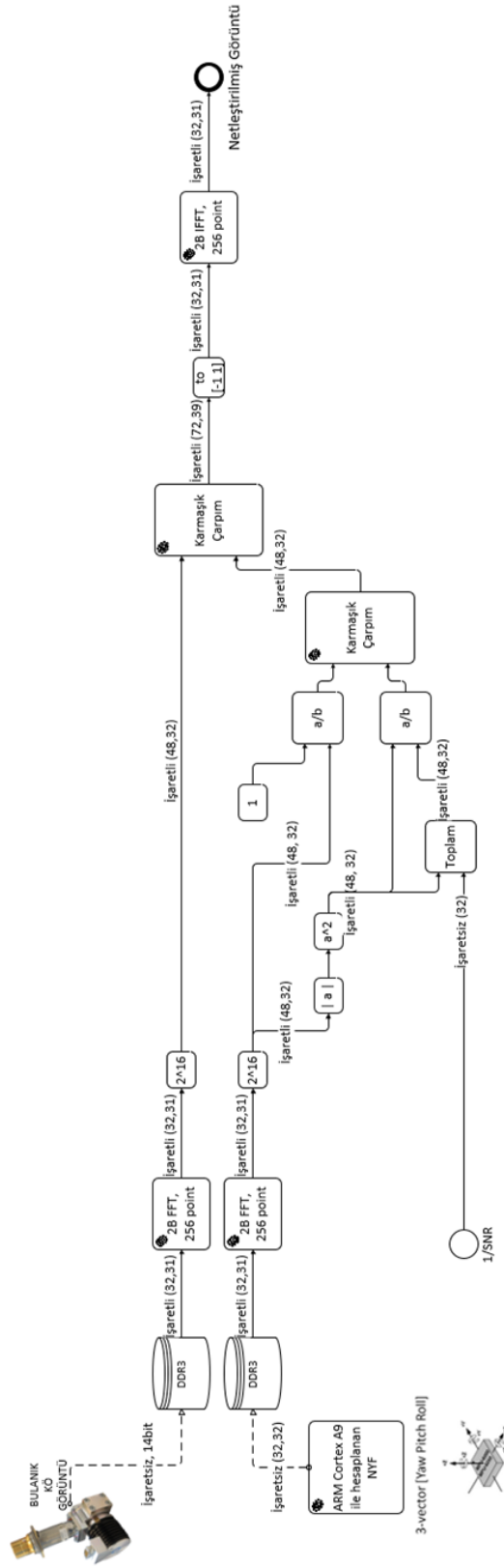




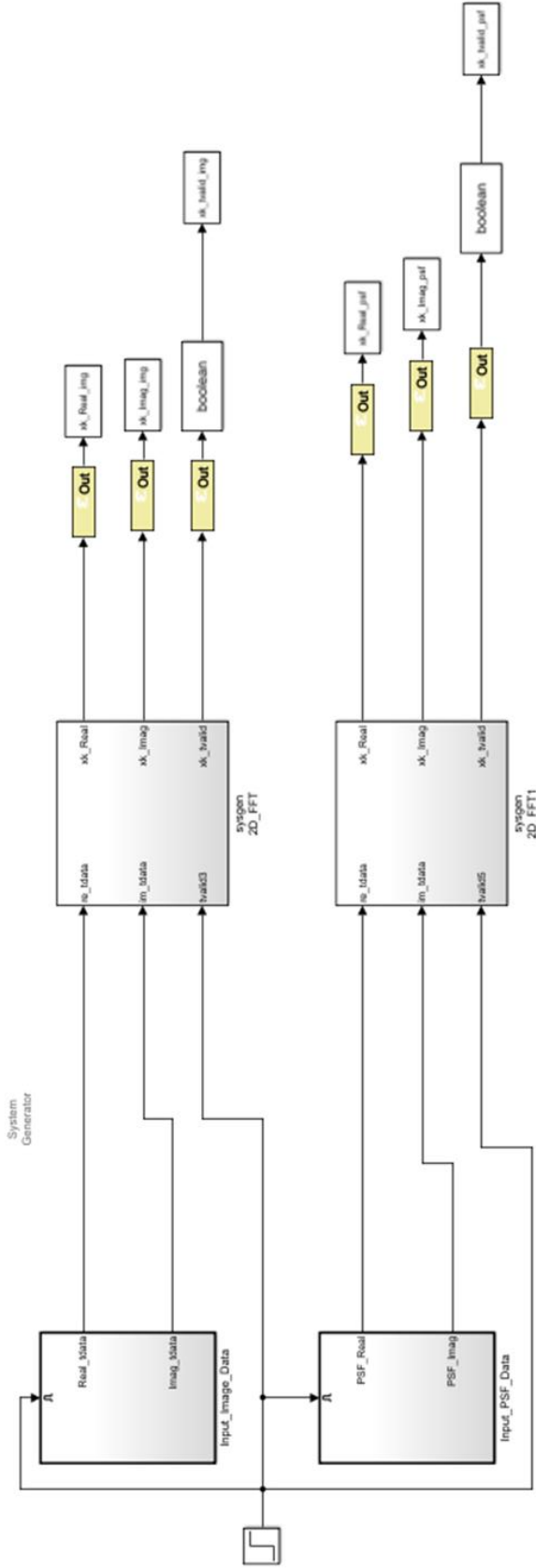
Şekil 5.24–Corner Turn Matris Yöntemiyle Devrik Alınması System Generator Tasarımı: “Ping-Pong” Tampon Bellek Bloğu Tasarımı



Şekil 5.25–Uzamsal Değişmeyen Bulanıklığın System Generator Tasarımı

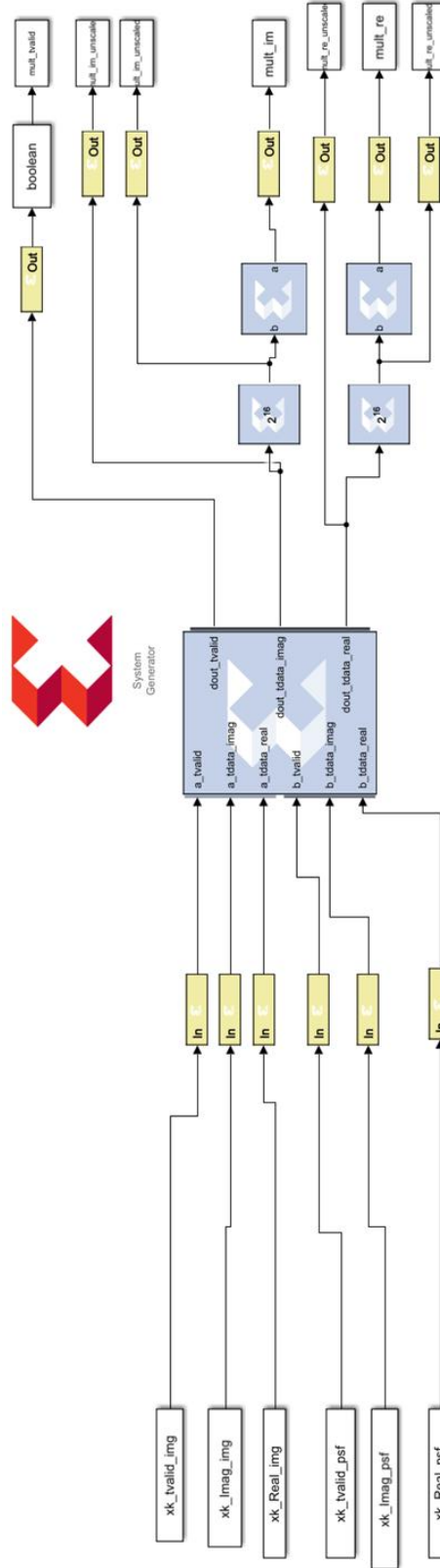


Şekil 5.26–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: Detaylı Algoritma Akış Şeması

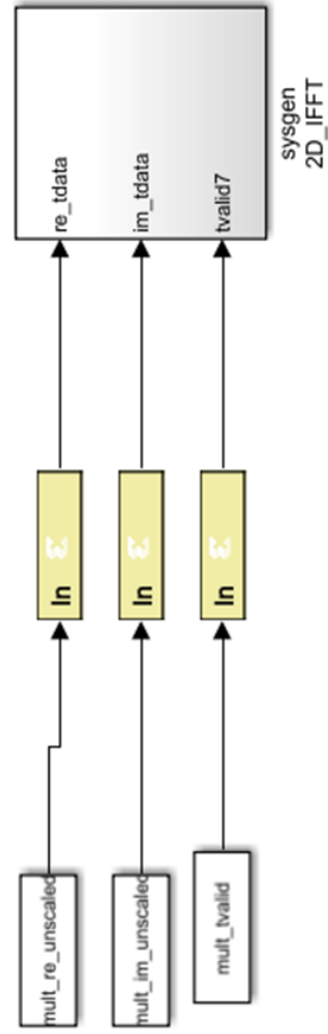


Şekil 5.27–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: Birinci Aşama Bulanık Görüntü ile Bulanıklık Filtresine 2B–FFT İşleminin Uygulanması

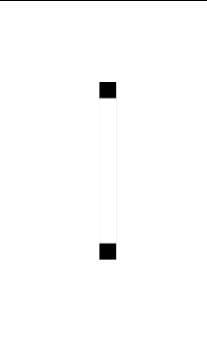
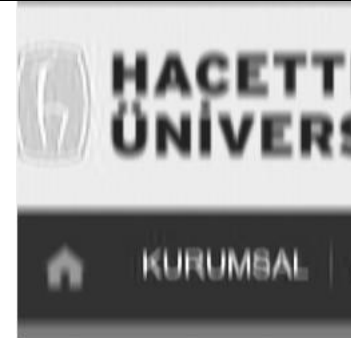





Şekil 5.28–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: İkinci Aşama Görüntü 2B–FFT ve Bulanıklıkma Filtresi 2B–FFT Sonuçlarının Karmaşık Çarpım İşlemine Tabi Tutulması

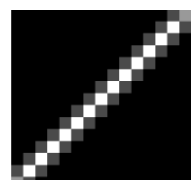


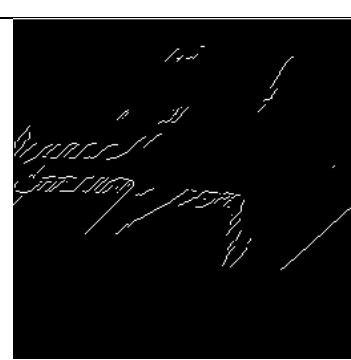





Şekil 5.29–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: Üçüncü Aşama Karmaşık Çarpım Sonucuna 2B–Ters FFT (İng. Inverse FFT) İşleminin Uygulanması

Piksel / Aç	NYF	Bulanık Görüntü	Netleştirilmiş Görüntü
10 piksel 90° yönünde			

Şekil 5.30–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: Sonuçlar-1 (Hacettepe)

Wiener filtreleme sonuçları ile Şekil 5.30 ve Şekil 5.31 verilmiştir.

Piksel / Aç	NYF	Bulanık Görüntü	Netleştirilmiş Görüntü
20 px. 45° yönünde			
		Sobel Filtreleme ile Çıkarılmış Kenarlar	
			
		CANNY Yöntemi ile Çıkarılmış Kenarlar	
			
		Net görüntüye göre PSNR : 16.4054	Net görüntüye göre PSNR : 20.2916

Şekil 5.31–Wiener Filtreleme System Generator Tasarımı: Sonuçlar-2 (jets)

## 5.2. Uzamsal-Değişen Bulanıklık için Deneysel Çalışmalar

Bu başlık altındaki çalışma, tekrarlayan en küçük kareler yönteminin MATLAB uygulamasıdır. Görüntülere sentetik olarak Uzamsal-Değişen Bulanıklık başlığı altında anlatılan bulanıklaşma modeline göre bulanıklık eklenerek sentetik görüntüler elde edilmiştir. Daha sonra Uzamsal-Değişen Bulanıklığın Yok Edilmesi başlığı altında anlatılan tekrarlayan en küçük kareler yöntemi MATLAB' da uygulanarak net görüntüler elde edilmiştir.

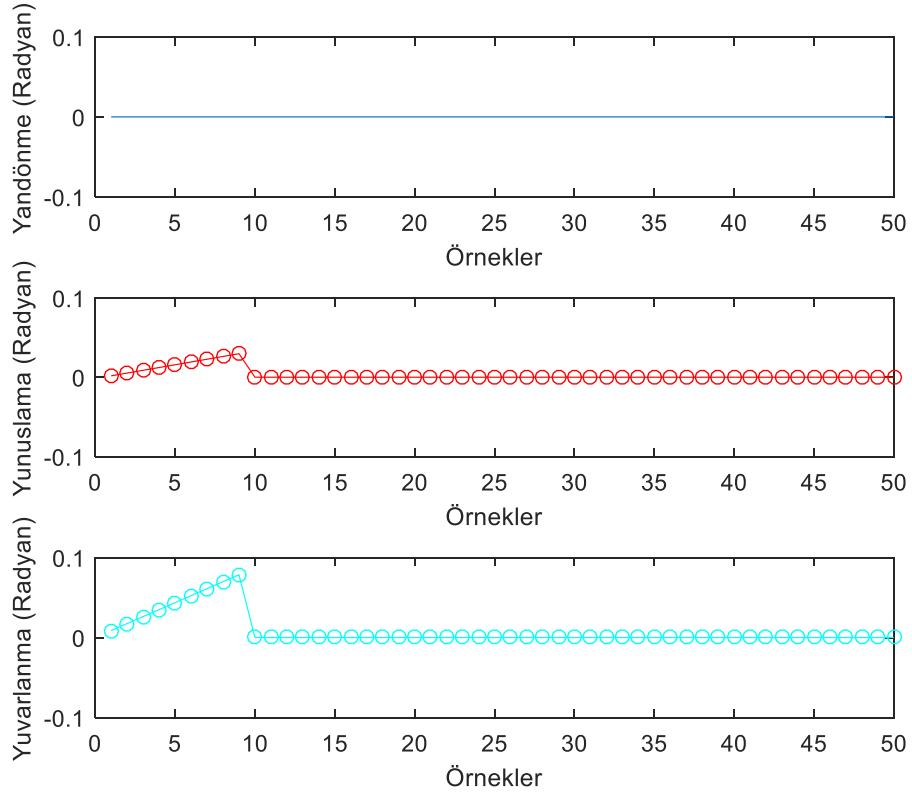
### 5.2.1.1. MATLAB Benzetimi

$$b = ki \quad (5.9)$$

Yukarıdaki vektör-matris çarpımı modelinde,  $b$  sütun-vektörü formundadır ve bulanık görüntüyü temsil eder.  $k$  seyrek matris formunda büyük bir matristir ve bulanıklaşma dönüşümünü temsil eder.  $i$  sütun-vektörü formundadır ve net görüntüyü temsil eder. Bu başlık altındaki testlerde biraz daha küçük boyutlarda görüntüler ile çalışılmıştır. Sentetik olarak net görüntülere bulanıklık eklenerek bulanık görüntüler elde edilmiştir. Büyük görüntülerde  $k$  matrisinin boyutları çok fazla büyümekte bu nedenle benzetim oldukça yavaşlamakta ve kullanılan bilgisayarın hafıza problemleri ortaya çıkmaktadır. Bu başlıktaki testlerde 128x128 boyutlarında görüntüler kullanılmıştır. Bu durumda A matrisi 16384 x 16384 boyutlarında "seyrek matris" formunda büyük bir matris çıkar. Net görüntüyü bulabilmek için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

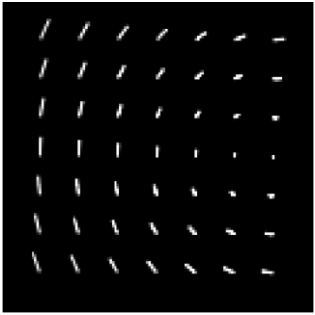
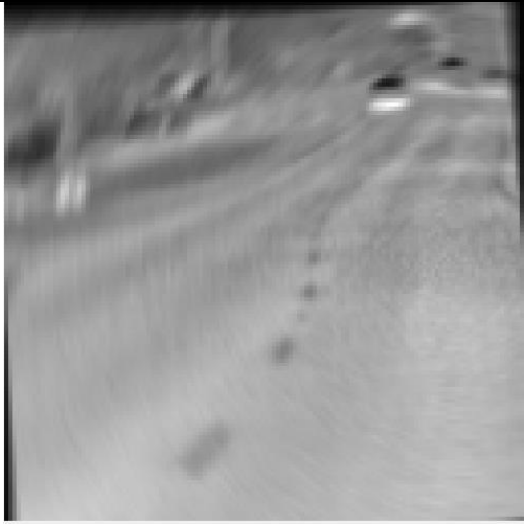

$$\min_i \|ki - b\|_2^2, \quad i > 0 \quad (5.10)$$

Bu sıfır-olmayan en küçük kareler (İng. non-negative least squares) denklemin çözümünde, büyük miktarda bilinmeyen bulunması durumunda hafızayı verimli şekilde kullanan Quasi Newton Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) yönteminin bir versiyonu olan Limited Memory-BFGS-B (L-BFGS-B) yöntemi kullanılmıştır. Kısıt olarak  $i > 0$  şartı kullanılmıştır. Bazı hareket senaryoları için sentetik olarak bulanıklaştırılan görüntüler, bu yöntem ile netleştirilmiştir.

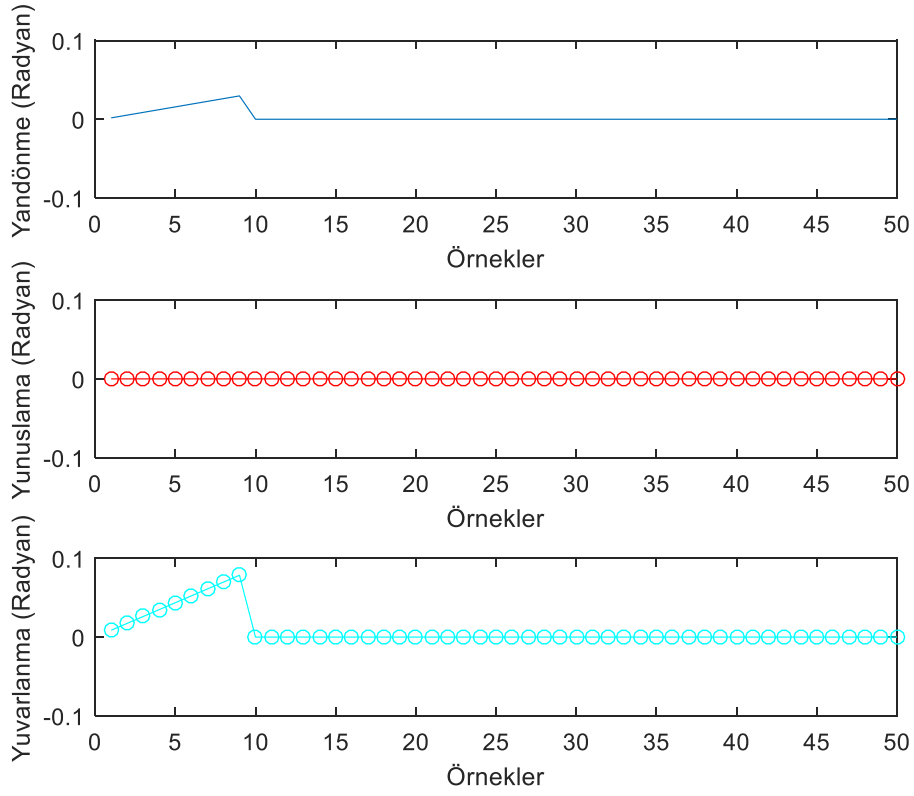


Şekil 5.32–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu-1

Yukarıdaki hareket senaryosu sonucu bulanıklaşan görüntü, L-BFGS-B yöntemiyle 22 saniyede 100 tekrar ile çözülmüştür. Netleştirilen görüntü Şekil 5.33 ile verilmiştir.

NYF	Bulanık Görüntü	Netleştirilmiş Görüntü
	 <p data-bbox="507 1843 914 1877">Net görüntüye göre PSNR : 21.03</p>	 <p data-bbox="1058 1843 1465 1877">Net görüntüye göre PSNR : 27.67</p>

Şekil 5.33-L-BFGS-B Yöntemi Kullanılarak MATLAB Görüntü Netleştirme Sonucu-



Şekil 5.34–KÖ Dedektör Hareket Senaryosu-2

Yukarıdaki hareket senaryosu sonucu bulanıklaşan görüntü, L-BFGS-B yöntemiyle 21,90 saniyede 100 tekrar ile çözülmüştür. Netleştirme Şekil 5.35 ile verilmiştir.

NYF	Bulanık Görüntü	Netleştirilmiş Görüntü
	Net görüntüye göre PSNR : 18.94	Net görüntüye göre PSNR : 28.78

Şekil 5.35-L-BFGS-B Yöntemi Kullanılarak MATLAB Görüntü Netleştirme Sonucu-

## 6. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, pozlama süresi boyunca KÖ görüntüleme sistemi hareketi belirli sınırların dışına çıkarsa alınan görüntünün bulanıklaşacağı sonucuna varılmıştır. KÖ dedektörün koordinat merkezini değiştirmeden yaptığı dönme hareketlerinin, doğrusal hareketlere göre bulanıklığa daha çok etkisi olduğu anlaşılmıştır. Bu hareket ataletsel ölçüm birimi (AÖB) gibi bir hareket sensörü kullanılarak ölçülebilirse, bulanıklığın pikseller mertebesinde ne kadarlık bozulmaya sebep olacağı bulunabilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen yazılım ile pozlama süresi boyunca KÖ dedektöre ait AÖB örnekleri kullanılarak, bulanıklaşma kaynaklı bozulmaları ifade etmek üzere Nokta Yayılım Fonksiyonu (NYF) olarak isimlendirilen bulanıklaşma filtreleri hesaplanabilmektedir. Pozlama süresi boyunca ne kadar çok AÖB örneği alınırsa, KÖ dedektör hareketine ait hesaplanan NYF' nin doğruluğu da orantılı olarak artacaktır.

KÖ görüntüleme sistemlerinde veya gün ışığı kameralarında pozlama süreleri kısaltılarak kamera hareketi kaynaklı bulanıklık ya da görüntülenen nesnenin hareketinden kaynaklı bulanık azaltılabilir. Fakat bununla birlikte, kısa pozlama süresi durumunda KÖ dedektörün nesneyi görüntülemek için daha az süresi olacaktır. Uzun pozlama süresi ise nesneden daha çok KÖ ışınım alınmasını sağlayacaktır. Düşük KÖ ışınım yoğunluğuna sahip nesnelerin görüntülerinde yüksek ayırt edicilik sağlamak üzere uzun pozlama süreleri kullanılır. KÖ dedektör pozlama süresi özellikle nesne ile arka-plan ışınım yoğunluklarının benzer olduğu durumlarda nesnelerin daha iyi görüntüsünün alınması için uzun tutulmaktadır. Bu durumda KÖ dedektör hareketinden kaynaklı bulanıklık kaçınılmaz olabilmektedir.

Görüntü netleştirme aşamasında bulanıklıklaşma için bir modelin benimsenmesi gerekir. Literatürde görüntünün her yerinin eşit miktarda bozulduğunu varsayan ve evrişim (*İng.* convolution) kullanılarak modellenen uzamsal-değişmeyen bulanıklaşma modelinin uzun yıllardır yaygın olarak kabul gördüğü ve bu yaklaşımla ilgili sürekli güncel çalışmaların ortaya çıktığı görülmüştür. Fakat uzamsal-değişmeyen bulanıklığın gerçek KÖ dedektör hareketinden kaynaklı bulanıklığı tam olarak modelleyemediği anlaşılmıştır. Bu yüzden literatürdeki diğer yaklaşım olan uzamsal-değişen yaklaşım ile KÖ dedektör hareketi kaynaklı bulanıklık modellenmiştir.

Uzamsal-değişmeyen bulanıklaşma modeli evrişim kullanılarak modellendiği için, görüntü netleştirme aşamasında FFT benzeri hızlı algoritmaların kullanılabilir. Bu çözümle ilgili MATLAB ortamında benzetimler yapılmıştır. Uzamsal-değişen bulanıklaşma modelinde tekrarlayan eniyilime tabanlı görüntü netleştirme çözümleri olduğu görülmüştür.

Gerçek zamanlı uygulanabilirlikleri değerlendirilen algoritmalarından uzamsal-değişmeyen bulanıklaşma modelinin, gerçek zamanlı olarak FPGA' de uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle birebir FPGA IP çekirdekleri kullanılarak System Generator ortamında Wiener Filtreleme uygulanmıştır. Burada gerekli olan 2B-FFT algoritması, 1B-FFT FPGA IP çekirdekleri kullanılarak uygulanmıştır. Gerçek zamanlı durumda 2B-FFT için devrik alma işleminin tüm görüntü işleme akışını yavaşlatacak derecede uzun süreceği anlaşılmıştır. Bu nedenle devrik almayı daha hızlı ve verimli hale getiren Corner Turn Matris yöntemi de System Generator ortamında FPGA iç hafızaları kullanılarak tasarlanmıştır. Bu şekilde CTM kullanılarak uygulanan 256-nokta 2B-FFT algoritmasının System Generator ortamındaki benzetimlerde yaklaşık 196K saat döngüsü sürdüğü görülmüştür. 150MHz olarak seçilen tasarım saat frekansı ile 256-nokta 2B-FFT işleminin yaklaşık 1,3ms süreceği hesaplanmıştır. Bulanık görüntü ve filtrenin her birinin 2B-FFT işlemi yeteri kadar mantıksal kaynağı olan FPGA kullanılırsa aynı anda hesaplanacak şekilde çoğaltılabilir. Wiener filtreleme için geriye kalan gecikmesiz matematiksel bloklar ile ters 2B-FFT işlemidir. En kötü durumda yeteri kadar FPGA iç kaynağı olmadığında, KÖ bulanık görüntü ve filtre aynı 2B-FFT bloğunu sıra ile kullanılırsa yaklaşık 2,6ms süreceği öngörülmüştür. Ters 2B-FFT işlemi de dahil edilirse tüm Wiener filtreleme tasarımının yaklaşık 4ms süreceği sonucuna ulaşılmıştır. Böylece Wiener filtreleme tasarımı örneğin, 30Hz' de görüntü veren bir KÖ dedektör ile gerçek zamanlı şekilde çalışabilecektir. Çünkü 4ms, 1 görüntü çerçevesi süresinin (33ms) oldukça altındadır. 2B-FFT System Generator tasarımının HDL kodu üretilmiştir. Xilinx Vivado programı ile sentezlenerek kaynak kullanımı Tablo 6.1 ile verildiği şekilde bulunmuştur. Böylece gerçek zamanlı olarak işlemeye uygun ve doğruluk seviyesi yüksek 2B-FFT System Generator tasarımı ortaya çıkmıştır. Tasarlanan 2B-FFT blokları kullanılarak, Wiener Filtreleme System Generator ortamında tasarlanmıştır. Ve bulanık görüntüleri netleştiren benzetim sonuçları elde edilerek PSNR cinsinden iyileşmeler gösterilmiştir.



Tablo 6.1–2B-FFT System Generator Tasarımı FPGA Kaynak Tüketimi

Kaynak Türü	2B-FFT Tasarımı Tarafından Kullanılan	Kapasite	Kaynak Kullanımı (%)
LUT	1514	274080	0,55
LUTRAM	67	144000	0,05
FF	423	548160	0,08
BRAM	228	912	25,00
BUFG	1	404	0,25

Yukarıda mimarisi anlatılan uzamsal-değişmeyen System Generator tasarımının KÖ dedektör düzlemi içinde kalan yunuslama ve yandönme hareketlerinden kaynaklı bulanıklığı çözmeye başarımlı iyi durumdadır. Bununla birlikte bu tasarım KÖ dedektör yuvarlanma hareketi sonucu ortaya çıkan yuvarlanma hareketi kaynaklı bulanıklığı gidermede başarımlı düşük kalmaktadır.

KÖ dedektör yuvarlanma hareketinden kaynaklı bulanıklık uzamsal-değişen sınıfta yer alır. Görüntünün tüm bölgesi eşit miktarda bozulmamaktadır. Bu yüzden tek bir bulanıklaşma filtresi kullanmak mümkün olmamaktadır. Gerçek zamanlı olarak uygulanabilirliği görece düşük olacağı değerlendirilmiştir. Uzamsal-değişen bulanıklık, evrişim (*Ing.* convolution) yerine vektör-matris çarpımı kullanılarak modellenmiş ve net görüntü tekrarlayan enyilime tabanlı en küçük kareler yöntemi ile MATLAB seviyesinde tasarlanmış ve benzetimler yapılmıştır. Bu tasarımda yuvarlanma hareketi kaynaklı bulanıklık da dahil daha karmaşık KÖ dedektör hareketlerinden kaynaklı bulanıklıkların da giderilebileceği görülmüştür. Bununla birlikte bu yöntemin işlem karmaşıklığı yüksek, hafıza kullanımı yüksek ve işlem süresi tek bir görüntü için oldukça uzundur. 128x128 boyutlarında görüntüler için MATLAB ortamında netleştirme süresinin ortalama 22 saniye olduğu görülmüştür.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] A. Rogalski, History of infrared detectors, *Opto–Electronics Review*, Springer, no. 3, p. 279–308, **2012**.
- [2] C. Kopp, The Sidewinder Story; The Evolution of the AIM-9 Missile, *Australian Aviation*, April **1994**.
- [3] W. D. Lawson, S. Nielsen, E. H. Putley ve A. S. Young, Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe, *J. Phys. Chem. Solids*, no. 9, pp. 325-329, **1959**.
- [4] A. Rogalski, Progress in focal plane array technologies, *Progress in Quantum Electronics*, Mart **2012**.
- [5] F. Shepherd ve A. Yang, Silicon Schottky retinas for infrared imaging, *IEDM Tech. Dig*, pp. 310-313, **1973**.
- [6] N. Joshi, S. . B. Kang, C. L. Zitnick and R. Szeliski, Image Deblurring using Inertial Measurement Sensors, in *ACM SIGGRAPH*, **2010**.
- [7] E. R. Fossum ve B. Pain, Infrared readout electronics for space-science sensors: state of the art and future directions, *Proc. SPIE 2020, Infrared Technology XIX*, **1993**.
- [8] B. Miller, E. Flug, R. Driggers ve P. Richar, Detector integration time issues associated with FLIR performance, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, **2006**.
- [9] F. Sizov, IR region challenges: Photon or thermal detectors? Outlook and means, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, pp. 183-199, **2012**.
- [10] D. W. Ball, Field Guide to Spectroscopy, Bellingham: SPIE Press, **2006**.
- [11] R. Wotiz , Infrared Thermal Detectors, *Circuit Cellar*, no. 260, pp. 54-58, **2012**.
- [12] Antony Rogalski, Infrared Detectors, pg. 3., **2011**
- [13] G. G. Artan, Kızılötesi Görüntüleme Sistemleri, Ankara, **2017**.
- [14] S. O. Kasap, Optoelectronics and Photonics, Pearson, **2012**.

- [15] K. Chrzanowski, Review of night vision technology, *Opto-Electronics Review*, p. 153–181, Haziran **2013**.
- [16] California Institute of Technology, Spitzer Space Telescope, 7 Şubat 2008. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.spitzer.caltech.edu/images/2158-sig08-005-Hands-in-a-Bag-black-and-white-Visible-vs-Infrared-Light>. [Erişildi: 29 Ocak **2019**].
- [17] R. Hudson, *Infrared System Engineering*, New York: Wiley, **1969**.
- [18] A. Rogalski, *Infrared Detectors*, pg. 20.,**2011**
- [19] C. A. Shah and W. Schickler, Automated Blur Detection and Removal in Airborne Imaging Systems Using IMU Data, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1*, Melbourne, Australia, **2012**.
- [20] B. Miller, E. Flug , R. Driggers ve P. Rich, Detector integration time issues associated with FLIR performance, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, **2006**.
- [21] E. R. Fossum ve B. Pain, Infrared readout electronics for space-science sensors: state of the art and future directions,*Proc. SPIE, Infrared Technology XIX*, **1993**.
- [22] I. Sofradir, Scorpio MW Documentation, **2017**.
- [23] M. Meftah, F. Montmessin, O. Korablev, A. Trokhimovsky, G. Poiet ve J.-B. Bel, High-resolution infrared detector and its electronic unit for space applications, *Sensors and Systems for Space Applications VIII, Proc. of SPIE*, April **2015**.
- [24] R. L. Espinola, K. R. Leonard, K. A. Byrd ve G. Potvin, Atmospheric turbulence and sensor system effects on biometric algorithm performance,*Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXVI*, Baltimore, **2015**.
- [25] A. K. Katsaggelos ve C. A. Segall, Digital Image Restoration—Classical, *Encyclopedia of Optical Engineering*, p. 411 — 427, **2003**.
- [26] N. Wang, J. Wang, Y. Zhang ve X. Sun, Restoration of the Infrared Image blurred by motion, *Selected Papers of the Chinese Society for Optical Engineering Conferences held October and November 2016*, Jinhua, Suzhou, Chengdu, Xi'an, Wuxi, **2016**.

- [27] S. V. ve M. K., Control of Inertial Stabilization Systems Using Robust Inverse Dynamics Control and Sliding Mode Control, *6. International Conference on Automotive Engineering (ICAE-6)*, Bangkok, **2010**.
- [28] Y. Wu, H. Ling, J. Yu, F. Li, X. Mei ve E. Cheng, Blurred Target Tracking by Blur-driven Tracker, *IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV 2011*, Barcelona, **2011**.
- [29] S. Harmeling, M. Hirsch ve B. Scholkopf, Space-variant single-image blind deconvolution for removing camera shake, *Advances in Neural Information Processing Systems 23 (NIPS 2010)*, **2010**.
- [30] W. H. Richardson, Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration, *Journal of the Optical Society of America*, cilt 62, no. 1, **1972**.
- [31] R. Fergus, B. Singh, A. Hertzmann, S. T. Roweis ve W. T. Freeman, Removing camera shake from a single photograph, *ACM Trans. Graph*, p. 787–794., 25 July **2006**.
- [32] Q. Shan, J. Jia ve A. Agarwala, High-quality motion deblurring from a single image, *ACM Trans. Graph*, 27 Ağustos **2008**.
- [33] Y. Yitzhaky, I. Mor, A. Lantzman ve N. Kopeika, Direct method for restoration of motion-blurred images, *J. Opt. Soc. Am.*, pp. 1512-1519, June **1998**.
- [34] FREE FLIR Thermal Dataset for Algorithm Training, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.flir.com/oem/adas/adas-dataset-form/>. [Erişildi: 29 Ocak **2019**].
- [35] M. Guarnieri, The Rise of Light – Discovering Its Secrets, *Proceedings of the IEEE*, pp. 467 - 473, Şubat **2016**.
- [36] Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, p. 1330–1334, **2000**.
- [37] OpenMVG (Multiple View Geometry) Documentation, [Çevrimiçi]. Available: <https://openmvg.readthedocs.io/en/latest/openMVG/multiview/multiview/>. [Erişildi: 1 Ocak **2019**].
- [38] O. Whyte, J. Sivic, A. Zisserman ve J. Ponce, Non-uniform deblurring for shaken images, *In Proc. Conf. Comput. Vision and Pattern Recognition, IEEE*, **2010**.

- [39] A. Gupta, N. Joshi, L. Zitnick, M. Cohen ve B. Curless, Single image deblurring using motion density functions, *In Proceedings of European Conference on Computer Vision*, **2010**.
- [40] G. B. Arfken ve H. . J. Weber, *Mathematical Methods for Physicists*, Elsevier Academic Press, p. 203, **2005**.
- [41] D. Kundur ve D. Hatzinakos, Blind image deconvolution, *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 43-64, Mayıs **1996**.
- [42] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Pearson Prentice Hall, **2008**.
- [43] N. Wiener, *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*, MIT Press, **1964**.
- [44] L. . B. Lucy, An iterative technique for the rectification of observed distributions, *The Astronomical Journal*, pp. 745-749, Haziran **1974**.
- [45] A. Levin, R. Fergus, F. Durand ve W. T. Freeman, Image and depth from a conventional camera with a coded aperture, *ACM Transactions on Graphics*, **2007**.
- [46] A. Levin ve Y. Weiss, User assisted separation of reflections from a single image using a sparsity prior, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 1647-1654, **2007**.
- [47] N. Joshi, C. L. Zitnick, R. Szeliski ve D. J. Kriegman, Image Deblurring and Denoising using Color Priors, *CVPR*, **2009**.
- [48] D. Krishnan, T. Tay ve R. Fergus, Blind deconvolution using a normalized sparsity measure, *CVPR*, Colorado Springs, CO, USA, **2011**.
- [49] A. Levin, Blind motion deblurring using image statistics, *In Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, **2006**.
- [50] S. Cho ve S. Lee., Fast Motion Deblurring, *ACM Trans. Graph.*, **2009**.
- [51] L. Xu ve J. Jia., Two-phase kernel estimation for robust motion deblurring, *In Proc. 10th European Conf. Comput. Vision. IEEE*, **2010**.
- [52] W. F. Charles ve S. J. Roberts, A tutorial on variational Bayesian inference, *Springer An International Science and Engineering Journal*, **2011**.

- [53] L. Xu, J. S. Ren, C. Liu ve J. Jia, Deep convolutional neural network for image deconvolution, *In NIPS*, **2014**.
- [54] C. V. Stewart, Robust parameter estimation in computer vision, *SIAM Reviews*, pp. 513-537, Eylül **1999**.
- [55] Y.-W. Tai, H. Du, M. S. Brown ve S. Lin, Image/video deblurring using a hybrid camera, *In Proc. CVPR*, **2008**.
- [56] Y. Wu ve S. Dai, Motion from blur, *In Proc. CVPR*, **2008**.
- [57] D. Krishnan ve R. Fergus, Fast image deconvolution using hyper-Laplacian priors, *In Advances in Neural Information Processing Systems*, **2009**.
- [58] R. D. Strum ve D. E. Kirk, First Principles of Discrete Systems and Digital Signal Processing, Addison-Wesley, **1988**.
- [59] DSP, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.xilinx.com/products/technology/dsp.html>. [Erişildi: 20 Ocak **2019**].
- [60] M. Mitchell, *Zynq for Video Applications*, Austin, **2012**.
- [61] *ZYNQ All Programmable Block Diagram*, Vivado 2017.2, Xilinx Inc., **2019**.
- [62] An LSI Macro-Block for DSP Applications, [Çevrimiçi]. Available: <https://iis-people.ee.ethz.ch/~kgf/aries/5.html#fig5.2>. [Erişildi: 21 Ocak **2019**].
- [63] W. Jim. [Çevrimiçi]. Available: <http://myfpgablog.blogspot.com/2010/07/fft-results-from-matlab-fft-bit.html>. [Erişildi: 22 Ocak **2019**].
- [64] Xilinx Zynq ZC702 Development Kit, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/ek-z7-zc702-g.html#hardware>. [Erişildi: 29 Ocak **2019**].
- [65] Example Design - Zynq-based FFT co-processor using the AXI DMA, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.xilinx.com/support/answers/58582.html>. [Erişildi: 22 Ocak **2019**].
- [66] D. Zhang, Y. Yang, Y. Song ve G. Du, Design and Implement of Large Dimension Matrix Transpose Based on DDR3 SDRAM, *Advanced Materials Research*, Switzerland, **2013**.



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/~~DOKTORA~~ TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 29/01/2019

Tez Başlığı / Konusu: ATALETSEL ÖLÇÜM BİRİMİ DESTEKLİ KIZİLÖTESİ GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ TASARIMI

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 108 sayfalık kısmına ilişkin, 29/01/2019 tarihinde ~~şahsen~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dâhil~~
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

29.01.2019

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Tugay DÖNER  
Öğrenci No: N14325483  
Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği  
Programı: Tezli Yüksek Lisans  
Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Dr. Öğr. Üyesi Dinçer GÖKÇEN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : TUGAY DÖNER  
Doğum yeri : ALTINYAYLA / SİVAS  
Doğum tarihi : 10/11/1991  
Medeni hali : BEKAR  
Yazışma adresi : -  
Telefon : -  
Elektronik posta adresi : doner.tugay@gmail.com  
Yabancı dili : İNGİLİZCE

### EĞİTİM DURUMU

Lisans : HACETTEPE ÜNİ., ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜH.  
Yüksek Lisans : HACETTEPE ÜNİ., ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜH.

### İŞ TECRÜBESİ

2015-2018 TÜBİTAK SAGE, Araştırmacı  
2018- ASELSAN A.Ş., Sayısal Tasarım Mühendisi