ADLİ BİLİŞİMDE KAYNAK DOĞRULAMA VE TANILAMADA İLERİ METODLAR

Ahmet KARAKÜÇÜK



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ADLİ BİLİŞİMDE KAYNAK DOĞRULAMA VE TANILAMADA İLERİ METODLAR

Ahmet KARAKÜÇÜK
0000-0002-3175-6041

Doç. Dr. Ahmet Emir DİRİK
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

BURSA-2021
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Doktora Tezi

ADLİ BİLİŞİMDE KAYNAK DOĞRULAMA VE TANILAMADA İLERİ METODLAR

Ahmet KARAKÜÇÜK

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet Emir DİRİK

İçerisinde bulunduğumuz çağ bilgi çağıdır. Bilgiye erişim oldukça ucuzlamış, birkaç yıl öncesinde tahmin bile edilemeyen yüksek kapasitede ve özellikteki bilgi işleme cihazları erişilir olmuştur. Akıllı telefonlar, çevrim-içi platformlar, bilgisayarlar ve genişband internet sayesinde bilginin mecrası internet haline gelmiş, bu mecra üzerinden sayısal içerik üretimi ve paylaşımı büyük bir ivme kazanmıştır. Bu gelişmeler, beraberinde bir takım olumsuzluklar doğurmuştur. Bilginin korunması çok zorlaşmış, büyük bir çaba ve emek harcasansa dahi bireylerin bizzat kullandıkları platformlar tarafından bilgilerinin ticarete konu edildiği ya da bu platformlarda tutulan kullanıcı bilgisinin kolaylıkla çalınabildiği görülmüş, yasadışı faaliyetlere ilişkin suçlayıcı bilgileri saklamak ve adli denetimden kaçınmak için yeni araçlar ortaya çıkmıştır.

Sayısal görüntülerin kaynaklarının, adli bilişim literatüründe "Photo-Response Non-Uniformity" (PRNU) izi adı verilen ve kamera sensörlerinin ışığa karşı ürettiği birörnek olmayan cevap işaretinden dolayı oluşan iz üzerinden doğrulanması ve tanımlanmasına ilişkin geliştirdiğimiz ve bireyin mahremiyetinin korunmasına ve suçlayıcı bilgileri gizlemekte kullanılabilen yöntemlerin aşılmasına yönelik yüksek başarımlı üç yöntem bu tez çalışması kapsamında literatüre kazandırılmıştır. Yöntemlerden ilki, mahremiyetin korunmasına yöneliktir. Kullanıcıların çektikleri fotoğraflar üzerinden takip edilebilmeleri PRNU-izi ile mümkün hale gelmiştir. PRNU, görüntüye çarpımsal olarak etki ettiğinden, bu izin bilinen şekillerde kaldırılması mümkün değildir. Önerilen yöntemle bu izin kaldırılması mümkün olabilmektedir. Yöntemlerden ikincisi, PRNU ile kaynak kamera takibini engelleyebildiği gösterilmiş olan "Yama-Eşleştirme" algoritmasıyla işlenmiş görüntülerde kaynak kamera tanımanın nasıl yapılabileceğini göstermektedir. Yöntemlerden üçüncüsü, görüntü dönüşümlerinin, yine PRNU bilgisi kullanılarak nasıl terslenebileceğini ve bu görüntülerde kaynak kamera tanımanın nasıl uygulanabileceğini göstermektedir.

Çalışmamızın, araştırmacılara daha iyi adli bilişim araçları geliştirmekte yol gösterici olacağını ve çağın olumsuzluklarını azaltmak için kullanılacağını ümit etmekteyiz.

Anahtar Kelimeler: örüntü gürültüsü, prnu, anonimleştirme, gürültü temizleme, bilgi güvenliği, görüntü işleme, sensörler, tanılama, ilişkilendirme, doğrulama, adli bilişim.
2021, ix + 102 sayfa.

ABSTRACT

Philosophy of Doctorate

ADVANCED METHODS FOR SOURCE AUTHENTICATION AND ATTRIBUTION IN DIGITAL FORENSICS

Ahmet KARAKÜÇÜK

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet Emir DİRİK

We live in the information age. Equipped with capable and feature-rich information processing devices that were impossible to imagine just a few years ago, people can now have affordable, fast, and almost constant access to information. Smartphones, online platforms, computers, and broadband internet access have made the internet the de-facto source for all kinds of information, tandem with the people's never-ending ambition for content creation and sharing. These developments brought adverse outcomes as well. Protecting the privacy of data has become an almost impossible feat. "Trusted" online platforms were revealed to be monetizing or found lacking in taking good care of user information, often-times siphoned by malicious parties. On a similar note, opposing parties have had more opportunities as new methods to avoid scrutiny become available for incriminating information.

This PhD thesis presents advanced digital forensics methods for source identification and attribution of digital cameras based on "Photo-Response Non-Uniformity" (PRNU) noise. This type of noise is caused by a non-uniform response of the sensor to the incident light. The proposed methods relate to privacy protection as well to the re-attribution of cloaked incriminating information. The first method relates to the protection of privacy. Anonymously published photographs can be clustered and traced back to camera owners with the use of PRNU based source camera identification techniques. Since PRNU is multiplicative, its removal was deemed not possible with known techniques. The proposed method makes the removal possible and provides a way to prevent such harm. The second method relates to the re-identification of images processed with an algorithm called Patch-Match, which was shown to impede PRNU based techniques. The third refers to image transformations. We have presented a method that can compute the reverse transform parameters of such applications using the PRNU noise. Therefore, we can regain the ability to identify the source camera of transformed images.

We believe the proposed methods taught in this study will help relieve the negative aspects of this age and serve as a guide for the researchers of the field to develop better digital forensics tools.

Key Words: pattern noise, prnu, anonymization, noise removal, information security, image processing, sensors, authentication, attribution, verification, digital forensics.
2021, ix + 102 pages

TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca bir an bile desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, koşulsuzca sundukları sevgileri ve sabırları için,

Danışmanım Doç. Dr. Ahmet Emir Dirik'e, doktora çalışmalarım süresince bana duyduğu güveni, verdiği desteği ve araştırmacılık ve öğreticilik konusunda şahsıma örnek olduğu için,

Prof. Dr. Nasir Memon'a ve Doç. Dr. Hüsrev Taha Sencar'a, birlikte gerçekleştirdiğimiz çalışmalarda şahsıma kazandırdıkları kıymeti ölçülemez deneyim ve bakış açısı için,

TÜBİTAK kurumuna ve EEEAG grubu hakemlerine, bu tezin ilk yarısında da anlatılan yöntemlerin geliştirilmesi için 113E092 numaralı proje kapsamında sağladıkları yapıcı eleştiriler, destek ve burslar için,

İsimlerini bilmediğim ilgili alan hakemlerine, makaleler hakkındaki yapıcı eleştirileri için,

Bursa Uludağ Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü ve Fen Bilimleri Enstitüsü yöneticilerine, sağladıkları araştırma olanakları için,

Teşekkür ederim.

Ahmet Karaküçük
..../..../....

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi
ABSTRACT vii
TEŞEKKÜR viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xi
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 7
2.1. Sayısal Görüntülerde Bulunan Ayırt Edici Cihaz Kalıntıları 7
2.1.1. Sensör Tozları 9
2.1.2. Sıcak ve Soğuk Pikseller 10
2.1.3. Örüntü Gürültüleri 11
2.2. PRNU-izi tabanlı KKT 13
2.3. PRNU-izi tabanlı KKT'ye yönelik karşı çalışmalar 15
2.4. PRNU-izi ile gerçekleştirilebilen diğer uygulamalar 17
3. MATERYAL VE YÖNTEM 20
3.1. Uyarlamalı PRNU temizleme yöntemleri 20
3.1.1. Kuramsal Model 20
3.1.2. Görüntü Kalitesinin Analizi 22
3.1.3. Önerilen Yöntemin Uygulanması ve Başarım Kriteri 23
3.1.4. Gürültü Giderme Algoritmalarının Yöntem Başarımına Etkisi 26
3.1.5. Yöntem Parametreleri ve Rakip Yöntemler 28
3.1.6. Deneylerde Kullanılan Görüntü Veri Tabanları 31
3.2. Yama Eşleştirme Yöntemiyle Anonimleştirilmiş Görüntülerde KKT 33
3.2.1. İçerik müdahalesine dayalı anonimleştirme yöntemlerinin KKT karşısında durumu 34
3.2.2. Saldırı Senaryoları ve Varsayımlar 34
3.2.3. Yöntem algoritması ve uygulamaya ilişkin detaylar 36
3.2.4. Yöntemin Başarım Ölçütleri 39
3.3. Geometrik Dönüşüme Uğramış Görüntülerle KKT 40
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 45
4.1. Uyarlamalı PRNU temizleme yöntemi, Düz Yüzey Düzeltme ve Basit Gürültü Temizleme yöntemlerinin PRNU tabanlı KKT karşısındaki başarımı . 46
4.1.1. Görüntü Veritabanları ve Yöntem Başarımları 47
4.1.2. Bulguların Değerlendirilmesi 51
4.2. Uyarlamalı PRNU temizleme yöntemi ve PRNU çıkartma yönteminin PRNU tabanlı KKT karşısındaki başarımı 54
4.2.1. Görüntü Veritabanları 54
4.2.2. Başarım 55
4.2.3. Anonimleştirilen Görüntülerin Kalite Bakımından Karşılaştırılması 56
4.2.4. Karşılaştırılan yöntemlerin KKT saldırıları karşısındaki gürbüzlüğü 57
4.2.5. Görüntü Kalitesinin Yöntem Başarımına etkisi 64
4.2.6. Gürbüzlük Testi: Önerilen yöntemlerin uç koşullar altında sınanması . . . 69

4.2.7. Bulguların Değerlendirilmesi 71
4.3. YE algoritması ile anonimleştirilmiş görüntülerde KKT 72
4.3.1. Görüntü Veritabanı 73
4.3.2. Saldırı Senaryosu #1: Homojen YE görüntü yığınında KKT 76
4.3.3. Saldırı Senaryosu #2: Heterojen YE görüntü Yığınında KKT 79
4.3.4. Küme Sayısının Arttırılmasının KKT başarımına etkisi 84
4.3.5. Bulguların Değerlendirilmesi 86
4.4. Geometrik Dönüşüme Uğramış Görüntülerde KKT Başarımı ve Bulguların Değerlendirilmesi 87
5. SONUÇ 92
KAYNAKLAR 98
ÖZGEÇMİŞ 102

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Açıklama
$\mathbf{I}$	Sensöre ulaşan ışık miktarı matrisi
β	PRNU güç katsayısı
d	Düz çerçeve
k	Karanlık çerçeve
$\mathbf{F}$	PRNU kamera parmak izi matrisi
$\hat{\mathbf{F}}$	PRNU kamera parmak izi matrisinin ($\mathbf{F}$) kestirimi
$\mathbf{N}_W$	Zaman bölgesinde elde edilen gürültü artığı matrisi
$\mathbf{N}_\Omega$	Dalgacık bölgesinde elde edilen edilen gürültü artığı matrisi
W	Zaman bölgesinde çalışan gürültü artığı çıkartımı fonksiyonu
Ω	Dalgacık bölgesinde çalışan gürültü artığı çıkartımı fonksiyonu
τ	PRNU tabanlı KKT karar eşiği değeri
Φ	Birleştirilmiş görüntü kümesi

Kısaltma	Açıklama
KKT	Kaynak Kamera Tanıma
YE	Yama Eşleştirme Yöntemi
BGT	Basit Gürültü Temizleme Uygulaması
DYD	Düz Yüzey Düzeltme Yöntemi
ÖY-1	Önerilen Yöntem 1
ÖY-2	Önerilen Yöntem 2
BPO	Bozulan Piksel Oranı
LiY	Li'lerin Yöntemi
ABO	Anonimleştirme Başarım Oranı
PCE	Peak-to-Correlation Energy (çev. Tepe-ilinti Enerji Oranı)
DSLR	Digital Single Lens Reflective
FPN	Fixed Pattern Noise (çev. Sabit Örüntü Gürültüsü)
PSNR	Tepe İşaret Gürültü Oranı
PRNU	Photo-response Non-Uniformity (çev. Birörnek Olmayan Işık Cevabı)
SSIM	Structural Similarity Index (çev. Yapısal Benzerlik İndeksi)
WDF	Dalgacık-tabanlı Gürültü Temizleyicisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Sayısal kameralarda görüntülerin elde edilmesi süreci 7

Şekil 3.1. Görüntü kalitesinin model parametrelerine göre değişimi 23
Şekil 3.2. Önerilen Yöntem Akış Diyagramı 24
Şekil 3.3. Gürültü giderme algoritmalarıyla elde edilen, gürültü kalıntılarının görsel karşılaştırması 26
Şekil 3.4. Görüntü alt kümeleri 38
Şekil 3.5. Geometrik dönüşüme uğramamış görüntülerde PRNU tabanlı KKT . 41
Şekil 3.6. Geometrik dönüşüme uğramış görüntülerde KKT 41
Şekil 3.7. Köşe tutucu noktalar ile görüntü dönüşümü 42

Şekil 4.1. Sony H50 ile elde edilen görüntülerde karşılaştırılan yöntemlerin başarımı 48
Şekil 4.2. Nikon D200 ile elde edilen görüntülerde karşılaştırılan yöntemlerin başarımı 49
Şekil 4.3. Panasonic FZ50 ile elde edilen görüntülerde karşılaştırılan yöntemlerin başarımı 50
Şekil 4.4. Yöntemlerin anonimlik kaldırma saldırısı karşısında gürbüzlükleri. . 59
Şekil 4.5. Yöntemlerin anonimlik kaldırma saldırısı karşısında gürbüzlükleri. Olympus ile çekilen örneklerin PCE değer dağılımları. 60
Şekil 4.6. Yöntemlerin anonimlik kaldırma saldırısı karşısında gürbüzlükleri. Nexus ile çekilen örneklerin PCE değer dağılımları. 61
Şekil 4.7. Orijinal ve anonimleştirmiş görüntü örnekleri 63
Şekil 4.8. Yöntemlerin uygulandığı görüntülerin JPEG kalite seviyesi ile PRNU benzerliğinin değişimi 66
Şekil 4.9. Yöntemlerin uygulandığı görüntülerin JPEG kalite seviyesi ile PSNR değerinin değişimi 67
Şekil 4.10. Yöntemlerin uygulandığı görüntülerin JPEG kalite seviyesi ile SSIM değerlerinin değişimi 68
Şekil 4.11. Uç koşullarda bir anonimlik kaldırma saldırısı karşısında yöntemlerin gürbüzlüğü 70
Şekil 4.12. Örnek orijinal ve yama-eşleştirilmiş görüntüler 74
Şekil 4.13. YE görüntü veritabanında yer alan görüntüleri PRNU benzerliği ve görüntü kalitesi değerlerinin dağılımı 77
Şekil 4.14. Eşleşmeyen ve eşleşen durumlarda, çeşitli alt küme genişlikleri için YE görüntü kümelerinin PRNU benzerlik değer dağılımları (PCE) . 80
Şekil 4.15. Görünüye uygulanan dönüşümler. 88
Şekil 4.16. Izgara tarama işlemi ile görüntü #1 için hesaplanan PRNU benzerlik konturunun çizimi 89
Şekil 4.17. Izgara tarama işlemi ile görüntü #2 için hesaplanan PRNU benzerlik konturunun çizimi 90

Şekil 4.18. Izgara tarama işlemi ile görüntü #3 için hesaplanan PRNU benzerlik konturunun çizimi 91

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Başlangıç durumu ve dönüşüm parametreleri. 43

Çizelge 4.1. Görüntü veri tabanı 46
Çizelge 4.2. Karşılaştırılan yöntemlerin ortalama PRNU benzerlikleri 48
Çizelge 4.3. Anonimleştirme Oranları 49
Çizelge 4.4. Karşılaştırılan yöntemlerin F-50 ile ölçüldüğünde ortalama korelasyon katsayı değerleri 51
Çizelge 4.5. Karşılaştırılan yöntemlerin görüntü kalitesine etkisi 51
Çizelge 4.6. Deneyde kullanılan veri tabanına ilişkin bilgiler 55
Çizelge 4.7. Karşılaştırılan yöntemlerle elde edilen görüntülerin PRNU benzerlikleri 56
Çizelge 4.8. İşlem sonucunda ulaşılan PRNU gürültü gücü katsayısı ve yöntemlerin döngü adeti değerleri 56
Çizelge 4.9. Yöntemlerle elde edilen anonim görüntülerin farksal (PSNR) kalite karşılaştırması 57
Çizelge 4.10. Yöntemlerle elde edilen anonim görüntülerin yapısal (SSIM) kalite karşılaştırması 57
Çizelge 4.11. Orijinal ve anonimleştirilmiş görüntülerin F-100 karşısındaki ortalama PRNU benzerlikleri 62
Çizelge 4.12. Nitelikli bir PRNU parmak izine (F-50) sahip hasım karşısında anonimliği korunan görüntülerin yüzdesel oranları 63
Çizelge 4.13. Nitelikli bir PRNU parmak izine (F-100) sahip hasım karşısında anonim-liği korunan görüntülerin yüzdesel oranları 64
Çizelge 4.14. Sıkıştırılmış görüntüler ile anonimleştirme başarımı 65
Çizelge 4.15. Sıkıştırılmış görüntüler ile anonimleştirme yöntemlerinin görüntü kalitesi başarımı 67
Çizelge 4.16. Sıkıştırılmış görüntüler ile anonimleştirme yöntemlerinin görüntü kalitesi (SSIM) başarımı 68
Çizelge 4.17. Yöntemlerin "mükemmele yakın" iki parmak izi karşısındaki anonimleştirme başarımı 69
Çizelge 4.18. YE Görüntü veri tabanının özellikleri 75
Çizelge 4.19. Senaryo #1 PCE değerleri 76
Çizelge 4.20. Senaryo #1 Birleştirilmiş kümelerin detayları 78
Çizelge 4.21. Senaryo #2: İncelenen durumların özellikleri 82
Çizelge 4.22. Senaryo #2: Yöntem kullanılarak ulaşılan PRNU benzerlik değerleri 82
Çizelge 4.23. Senaryo #2: Birleştirilmiş kümelerinin detayları 83
Çizelge 4.24. Senaryo #2: Alt küme uzunluğu ile KKT başarımının karşılaştırılması 84
Çizelge 4.25. Senaryo #1: Toplam Geri Çağırma oranlarının örneklenen alt kümelerin sayısına ve alt kümelerin uzunluklarına göre değişimi . . 85
Çizelge 4.26. Senaryo #2: Toplam doğruluk oranlarının örneklenen alt kümelerin sayısına ve alt kümelerin uzunluklarına göre değişimi 86

Çizelge 4.27. Görüntülerin başlangıç durumu ve dönüştürülmelerinde kullanılan köşe noktaları. 88
Çizelge 4.28. Kestirilen dönüşüm parametreleri ve korelasyon sonuçları 90

1. GİRİŞ

Günümüzde çoklu ortam (ses, görüntü, video) sistemleri gittikçe ucuzlamakta ve günlük yaşamın hemen her alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle akıllı telefonlarının fiyatlarındaki düşüş ve kablosuz veri aktarım hızlarındaki artış ile sosyal ağlar üzerinden (Facebook, Twitter, Instagram, vs.) anlık ses, görüntü, hatta video paylaşımı yapmak büyük oranda kolaylaşmış ve neredeyse sıradan bir eylem halini almıştır. Bu durum kişisel bilgilerin gizliliği hususunda da birçok yeni problemi beraberinde getirmektedir. Sosyal ağ olarak tabir edilen paylaşım ortamlarında bireylerin kişisel bilgilerinin gizliliğinin korunması ve kimlik hırsızlığının engellenmesi için bir kısım teknik önlemler bulunmaktadır. Ancak alınan bu önlemler birçok konuda yeterli olmamaktadır. Hatta, kişilerin bulunduğu ortamların takibi elektromanyetik imzalarla bile gerçekleştirilebilmektedir (Souza ve diğerleri, 2020).

Görüntü işleme alanındaki son gelişmeler yardımı ile internet ortamında paylaşılan görüntü ve videolar üzerinden bu verileri sağlayan kullanıcıların tespiti ve takibi mümkün olabilmektedir. Ayrıca paylaşılan görüntü ve videoların analizi ile bu görüntülerin çekildiği cihazı seri numarasına kadar bir doğrulukla tespit etmek mümkündür (Lukáš ve diğerleri, 2005; Chen ve diğerleri, 2007; Lukáš ve diğerleri, 2006). Bu teknoloji kişilerin gizlilik haklarını tehdit edecek şekilde de kullanılabilir ve kullanıcılar farkında olmadan internet ortamında gayri resmi olarak takip edilebilirler. Farklı isim ve hesaplar kullanan bir kişinin yaptığı görsel paylaşımlar üzerinden gerçek kimliği (kamera seri no kadar ayırt edici bir şekilde) ve ne zaman, nerede bulunduğu (coğrafi etiket ve zaman bilgisi ile) kendisi farkında olmadan kümelendirilebilir. Kişisel gizlilik hakkının korunması problemi sadece bireyler için değil, kurumlar için de büyük önem arz etmektedir. Gizliliğin ve veri güvenliğinin çok önemli olduğu devlet organları, savunma kuvvetleri, istihbarat ajansları gibi kurumlar dahi bu tehdit alanına girmekte ve takip edilebilmektedirler.

Sayısal imge ya da videolar üzerinden kaynak cihaz tespiti için adli görüntü işleme yöntemlerinden faydalanılmaktadır (Lukáš ve diğerleri, 2005; Chen ve diğerleri, 2007;

Dirik, 2011; Sencar ve Memon, 2013). Bu yöntemler içinde en öne çıkanı kamera sensörlerinin kendilerine has gürültüden bir karakteristik örüntünün elde edilmesi ve bu örüntünün, kaynağı sorgulanan bir görüntünün üzerinde yer alıp almadığının korelasyon fonksiyonu ile ölçülmesi esasına dayanmaktadır (Lukáš ve diğerleri, 2006).

İlgili sensöre ilişkin özel olan bu gürültü örüntüsü, kamera sensörlerinin üretiminde kaçınılmaz olarak bulunan bir takım kusurlar sonucunda, her bir kamera sensörünün ışık hassasiyetinin farklı bir karaktere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Sensörün ışık hassasiyetindeki bu farklılık, "birörnek olmayan ışık cevabı" (Photo-Response Non-Uniformity kısaca PRNU) gürültüsü örüntüsü olarak adlandırılmaktadır (Holst, 1998; Janesick, 2001).

PRNU gürültü örüntüsü kamera cihazına, daha özel olarak da sensöre özeldir ve zamana bağlı olarak değişim göstermemektedir. Bu da PRNU örüntüsünün sayısal kameralara özgü doğal bir parmak izi olarak kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece herhangi bir görüntünün hangi sayısal kamera ile veya hangi sayısal kameraya sahip cihaz ile (akıllı telefon, dizüstü, tablet pc, vb.) çekildiği kolaylıkla tespit edilebilmektedir (Goljan ve diğerleri, 2009).

Özellikle akıllı cep telefonlarının bankacılık ve ödeme uygulamalarıyla birlikte adeta nüfus cüzdanından da fonksiyonel hale gelmesi nedeniyle bu cihazlarda biyometrik giriş doğrulama donanımları (parmak izi, yüz tanıma, vb.) sık rastlanır olmuş, akıllı cep telefonları sahipleri açısından oldukça kişisel ve paylaşılması zor bir cihaz haline gelmiştir. Bu nedenle, herhangi bir görüntüden, belirli bir cep telefonuna kadar kaynak kamera cihazının tespiti yapılabildiğinde, kameranın sahibi yani görüntüyü çeken bireyin kim olduğuna ilişkin yüksek doğrulukta bir bilgi çıkartılabilmektedir. Bu bilgi üzerinden kişilerin takibi de mümkün olacaktır. Dahası, böylesi bir yöntemin detaylarına hakim ve kötü niyetli bir hasım, bir suç örgütü tarafından üretilen yasal olmayan içerikli görüntüleri, masum bir bireyin ya da devlet organının kamerasından çıkmış gibi göstermeyi başarma imkanına da sahiptir. Ayrıca PRNU-örüntüsü değiştirilmiş bir görüntü mahkeme önüne delil olarak getirildiğinde, soruşturmanın yanlış yönlendirilmesine ve masum birey ya da kurumların haksız yere zan altında kalmasına sebep ol-

unabilir. Ki bu şekilde bir parmak izi değiştirme yaklaşımı literatürde incelenmiştir (Steinebach ve diğerleri, 2010).

PRNU tabanlı kaynak tespit yöntemi ile kaynak kamera tanıma yapılmasını engellemek üzere 2014 yılına değin bir dizi ilksel karşıt çalışma yapılmasına karşın, PRNU tabanlı kaynak tespit yöntemini geçersiz kılacak elle tutulur bir sonuç alınamamıştır (Steinebach ve diğerleri, 2010; Böhme ve Kirchner, 2013; Gloe, 2012; Goljan ve diğerleri, 2010a). Karşıt çalışmaların bazılarında PRNU-izinin tahmini ve kaldırılabilmesi için kaynak kamera cihazının elde olması ve özel olarak aydınlatılmış ortamlarda çekim yapılması gerekmektedir. Bu da kamera erişimin mümkün olmadığı ya da özel çekim yapma imkanının bulunmadığı durumlarda PRNU örüntüsünün zayıflatılamayacağı veya kaldırılamayacağı anlamına gelmektedir.

Görsel içeriğe dayalı sosyal medya kullanımının artmasından dolayı görüntüleme cihazlarının içerik üretme amacıyla kullanımında ise, görüntü zenginliğinin (doygunluk, parlaklık, vb.) arttırılmasında birden fazla kameradan gelen verilerin birleştirilmesi ya da kullanıma alanına uygun bir şekilde yeniden biçimlendirilmesi (kırpma, yeniden boyutlandırma, geometrik dönüşüme uğratılması, nesne silme, vb) uygulamalarıyla sıklıkla karşılaşılmaktadır ve bu gibi uygulamalar da PRNU izi tabanlı adli bilişim uygulamalarının gerçekleştirilmesinde bazı zorluklara sebebiyet vermektedir. Entrieri ve Kirchner (2016) ve literatürdeki yakın zamanlı çalışmalarda bu gibi uygulamalara dayanılarak, PRNU-izinin yapısının yalnızca mevcut görüntülere dayanılarak bozulmasının da mümkün olduğu da gösterilmektedir (Dirik ve diğerleri, 2014). Bu gibi yöntemlerde görüntü içeriğine mahsus değişiklikler yapılarak görüntüden elde edilen PRNU-izi ile, kameradan elde edilen parmak izinin arasındaki eşleşmenin bozulmasına dayanılmaktadır. Bu gibi yöntemler görüntü içeriğinde bozulmalara sebep olmakta veya görüntünün en boy oranını değiştirmektedirler, ancak PRNU tabanlı KKT'nin çalışmasını engelleyebilmektedirler.

İlgili literatüründe senaryo betimlemelerinde iki adet taraf sıklıkla karşımıza çıkmaktadır: Adli bilişim (ing. Forensics) ve karşı adli bilişim (counter-forensics). Her bir taraf için öteki "bozguncu" ya da "hasım", kendisi ise "analizci" olarak nitelendirilmek-

tedir. Bu iki taraf arasındaki yarış sıklıkla kedi-fare oyununa benzetilir, zira her bir taraf ötekinin varmak istediği sonuca (ör. delili doğrulamak ve delili geçersiz kılmak) ulaşmasını engellemek için çeşitli çalışmalar yapmaktadır. Söz konusu adli deliller olduğunda, genellikle kriminal laboratuvardaki çalışanlar veya bilirkişi - uzmanlar "analizci" yahut "bilirkişi" olarak adlandırılırlar.

Tez kapsamında her iki tarafın da kullanabileceği yöntemler açıklanacaktır. Diğer bir deyişle, görüntülerde kaynak doğrulama ve tanılama kapsamında, PRNU-izi ile KKT uygulamalarının yukarıda anlatılan iki veçhesine de yönelik olarak, hem gerçeklenmesine hem de engellenmesine yönelik literatüre bu tez kapsamında kazandırılan üç yöntem önerilecektir. Bunlardan ilki ve tezin ana konusu, kaynak kamera tanımanın engellenmesi, diğer bir deyişle karşı adli bilişim üzerinedir.

Bilindiği üzere, kişisel bilgilerin gizliliği ve gizlilik hakkının korunması günümüzde gittikçe artan bir öneme sahip olmaktadır. Kişisel gizlilik hakkı kavramı ile sadece kişi ya da kurumlara ait isim, adres, kimlik numarası gibi bilgilerin saklanması kast edilmemekte, kişi ya da ilgili kurumun korumak istediği tüm bilgilerin izinsiz bir şekilde elde edilmesinin ve kullanımının engellenmesi ifade edilmektedir. Bu kapsamda adli kanıt uygulamalarındaki son gelişmeler ile sayısal görüntülerde veya videolarda bulunan "Photo-Response Non-Uniformity" gürültüsü kaynaklı sensör örüntüsünün, ya da tez kapsamında kullanacağımız ismi ile, PRNU gürültüsünün, görüntülerin çekildiği kamera veya video cihazı hakkında da bilgi verdiği ortaya çıkmış bu da beraberinde bazı güvenlik ve gizlilik problemlerini gündeme getirmiştir. Örneğin bir suç ya da illegal faaliyete şahit olan ve bu olayı fotoğraflayarak medya ile paylaşan bir kişi kendisinin isminin ilgili suç ile ilişkilendirilmemesi için gizlenmesini talep edebilir. Ancak paylaştığı sayısal fotoğraftaki PRNU izi yardımı ile kişinin sosyal medya profilleri tespit edilebilmektedir. Sayısal görüntü ve videolar için PRNU izinin kaldırılarak anonimleştirilmesi bu tip gizlilik ve güvenlik problemlerinin çözümü için etkili bir yol olabilir. Ancak mevcut literatür dahilindeki akademik çalışmalar PRNU izinin görüntü kalitesini bozmadan ortadan kaldırılmasının mümkün olmadığını göstermektedir (Goljan ve diğerleri, 2009, 2011). Bununla beraber, sayısal görüntü ve videoların hukuk

önünde delil olarak sunulmaya başladığı günümüzde, PRNU-izi tabanlı kaynak tespit metotlarının ters mühendislikle delil karartma için de kullanılabilme olasılığı yargılamaların yanlış yönlendirilmesine ve suçsuz kişilerin belki de suçlanmasına sebep olabilecektir. Dolayısı ile PRNU izinin kaldırılabilirliğinin veya değiştirilebileceğinin bilimsel metotla ispat edilmesi hukuk uygulamaları açısından da büyük bir öneme haizdir.

Tez kapsamında, ilk olarak, sayısal kamera özelliği bulunan cihaz ve sistemler için (akıllı telefon, tablet PC, bilgisayar, DSLR kamera, video kayıt cihazları, vs.) fiziksel erişime gerek olmadan ve görüntü kalitesini koruyarak PRNU-izinin tespit edilebilir seviyenin çok altına indirebilen bir yöntemin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bilebildiğimiz kadarı ile önerdiğimiz bu yöntem yukarıda açıklanan kapsam dahilinde PRNU-izinin kaldırılması ve sayısal imgelerin anonimleştirilmesi konusunda literatürde bir ilk teşkil etmekte ve bu alanda yapılan diğer çalışmalardan önemli bir şekilde ayrılmaktadır.

Temel olarak, önerdiğimiz yöntem bir görüntünün üzerinde bulunan PRNU-izinin gücünün kestirimine dayanmaktadır. Hassas olarak kestirilen ve gücü belirlenen PRNU-izi daha sonra imge üzerinden çıkarılacaktır. PRNU izi ve ve gürültü gücünün kestirimi uzamsal alanda iki alternatif filtre kullanılarak gerçeklenecek, sonrasında ise çekilen görüntülerdeki PRNU-izi zayıflatılarak sayısal bir imge üzerinden kaynak kamera tespitinin engellenebileceği gösterilecektir.

Yöntemimiz, cihaz tipi veya görüntü içeriğine bağlı kalmadan PRNU-izini kaldırmayı başarmaktadır. Gerek akıllı telefonlar, gerekse sayısal kameralar ile yaptığımız çalışmalar PRNU-izinin önerilen şekilde kaldırılabildiğini ve imge anonimleştirmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Önerdiğimiz anonimleştirme yöntemi akıllı telefonlar, sayısal kameralar, video kaydediciler, tablet PC gibi cihazlarda donanım veya yazılım kapsamında uygulanarak çekilen görüntü veya videolar üzerinden kaynak takibi engellenebilmektedir. Ayrıca sosyal paylaşım sitelerinde görüntü veya video paylaşımı esnasında otomatik veya isteğe bağlı olarak önerdiğimiz metot çerçevesinde PRNU-izi örüntüsü zayıflatılarak kaynak anonimleştirme gerçeklenebilmektedir. Ele alınan problemin güncelliği ve önerilen çözümün yeniliği bu çalışmayı ve birçok farklı arayüzde ve cihazda kullanılabilir olmasını sağlamaktadır (Dirik ve Karaküçük, 2014; Karaküçük ve

Dirik, 2015; Dirik ve Karaküçük, 2019).

Tez kapsamında önerilen diğer yöntemlerde ise, literatürde yakın zamanda işlenmeye başlayan ve görüntü içeriğiyle bağlantılı müdahalelere dayanan PRNU bozucu yöntemler ile anonimleştirilen görüntülerden, yeniden KKT yapılabilmesine yönelik adli bilişim yöntemleri geliştirilmiştir.

Bu kapsamda değerlendirilen birinci PRNU bozucu yöntem, esasında yapısal görüntü içeriği düzenlemeye yönelik geliştirilen ve ticari görüntü düzenleme yazılımlarında yer alan "Yama-Eşleştirme" (Patch-Match) algoritmasına dayalıdır. Bu KKT karşıtı yöntem oldukça başarılıdır ve 2014 öncesindeki yöntemlere nispetle herhangi bir ilave bilgiye erişmeden KKT yapılmasını engelleyebilmektedir. Tez kapsamında önerdiğimiz yöntem ile Yama-Eşleştirmeye dayalı yöntem ile anonimleştirilen görüntülerin rasgele gruplandırılarak tespit edilmesi mümkün olmaktadır. Tez kapsamında, önerdiğimiz anonimleştirme karşıtı yöntemin başarımı iki farklı adli senaryo altında incelenektedir ve bahsi geçen yöntemle anonimleştirilen görüntülerin kümelendirilerek görüntünün elde edildiği kamera ile ilişkilendirilmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir. Yöntemimimiz, ilgili literatürden bilebildiğimiz kadarı ile bu KKT-karşıtı tedbirin aşılmasına yönelik ilk anonimleştirme karşıtı yöntemi teşkil etmektedir (Karaküçük ve Dirik, 2019).

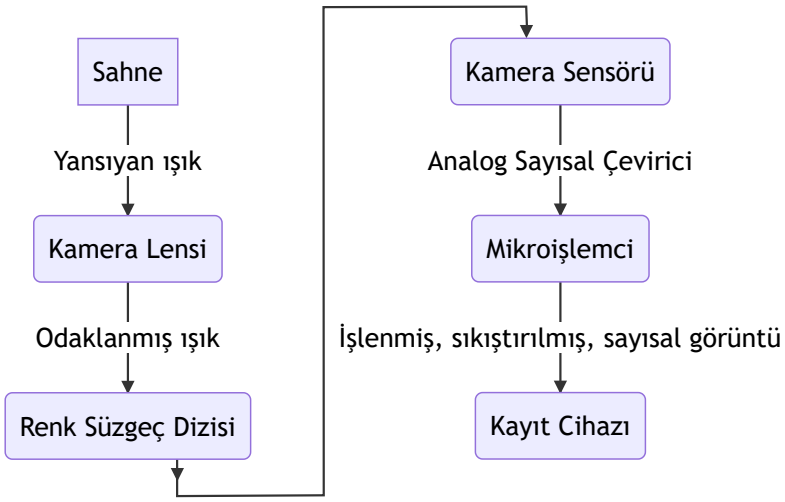
PRNU-izini bozan bir diğer uygulama ise, görüntülere geometrik dönüşümlerin uygulanmasıdır. Bu gibi dönüşüm işlemleri özellikle panoramik görüntü elde ediminde cihazlar tarafından doğrudan gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, video içeriklerinde titreme-karşıtı düzeltme algoritmalarında da geometrik dönüşümlerden faydalanılmaktadır. Dolayısı ile bu dönüşümler, kullanıcının herhangi bir özel bilgisi ve müdahalesini gerektirmeden, doğrudan cihazda yerleşik yazılım ve donanım kullanılarak kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir ve görüntülerin kamera ile ilişkisinin kurulmasını engelleyecek kullanımı kolay bir PRNU bozucu yöntemi teşkil etmektedirler. Ancak tez kapsamında önerilen yöntem ile, uygulanan geometrik dönüşümün ters dönüşümünü PRNU bilgisi kullanarak bulmak mümkün olmaktadır. Bu sayede bu görüntülerden de KKT yapılabilmesi imkan dahiline girmiştir (Karaküçük ve diğerleri, 2015).

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, tez boyunca yararlanılan kuramsal temeller ve bunlarla ilgili kaynaklar sunulacaktır. Bunlar temel olarak iki konuyu kapsamaktadır: (1) Kaynak Kamera Tanıma (KKT) yöntemleri; (2) Kaynak Gizleme (KG) yöntemleri. Devam eden kısımda, öncelikle KKT yöntemlerinin temelleri, konunun adli araştırma (ing. forensics) literatüründeki geçmişinden kısaca bahsedilecek, sonrasında kaynak kamera tanıma kısmına geçilecektir. Burada KKT alanındaki en kayda değer kullanıma sahip ve doktora tezinin üzerine inşa edileceği PRNU gürültüsüne ve bu gürültünün KKT amaçlı kullanımına ilişkin literatür detaylıca anlatılacaktır. Sonrasında, tez kapsamında literatüre yapılan kaydadeğer katkıların bulunduğu Kaynak Gizleme (KG) yöntemlerine ilişkin literatür sunulacaktır. Tez kapsamında önerilen yöntemlere ilişkin bazı literatür, ilgili yöntemlerin anlatıldığı kısımlarda detaylandırılacaktır.

2.1 Sayısal Görüntülerde Bulunan Ayırt Edici Cihaz Kalıntıları

Bu bölümde, sayısal görüntülerde tespit edilen ve ilgili görüntünün çekildiği cihaza ilişkin ayırt edici nitelikte bilgi sağlayan kalıntılara ilişkin literatür kısaca anlatılacaktır. Sayısal bir görüntü elde edilene kadar geçilen aşamalar Şekil 2.1'de basitleştirilmiş bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Sayısal kameralarda görüntülerin elde edilmesi süreci

Şekil 2.1'de yer alan aşamaları kısaca özetlemek gerekirse, bir enerji kaynağı ile aydınlatılan sahneden yansıyan ışık, kamera lensi ile bir renk süzgecinin üzerine düşürülmektedir. Renk süzgeci, ince bir film yapısındadır ve optik filtre vazifesi görmektedir. Bu süzgeçten geçen ışık, kamera sensörüne ulaşmaktadır. Kamera sensörü üzerinde uzamsal olarak dizilmiş tekil ışık sensörleri yer almaktadır. Bu ışık sensörlerinin adeti sensörle üretilebilen görüntülerin çözünürlüğünü (diğer bir değişle piksel sayısını) belirler. Her bir sensör ile renk süzgecinden geçen ışığın şiddeti ölçülür ve analog sayısal çevirici üzerinden bir sayısal değere atanır. Bu değer dizisi mikroişlemci kısmına aktarılır ve renklendirme işlemi gerçekleştirilir, bu esnadaki görüntü verisine "ham" (raw) görüntü adı verilmektedir. Ham veriler büyük boyutlu olduklarından ancak kayıt cihazına veri aktarım arayüzünün band genişliğinin elverdiği durumlarda bu ham verinin kayıt cihazından elde edilmesi mümkün olmaktadır. Pek çok kamerada ise bu mümkün değildir ve kayıt cihazına (bellek kartı, usb arayüzü, vb.) yalnızca JPEG gibi bir algoritma ile sıkıştırılmış bir görüntü aktarılabilmektedir.

Özetten de anlaşılacağı üzere sahne ve kayıt cihazı haricinde görüntünün elde ediminde pek çok aşamadan geçilmektedir. Bu aşamaların her birinde kullanılan arabirimin üretiminde çeşitli hatalar meydana gelebilmekte yahut kullanım kaynaklı aşınmalar ve yıpranmalar (ing. wear and tear) oluşabilmektedir. Bu gibi durumlar çeşitli şekillerde kayıt cihazına kadar gelen sayısal görüntüde kalıntılar bırakmaktadır ve bu kalıntılardan kaynak kameraya ilişkin pek çok bilgiye ulaşılması mümkün olmaktadır. Adli araştırmalar için bu bilgiler değerlidir, ki adli balistik alanında bu gibi hatalardan yola çıkılarak ateşli silahlardan çıkan kurşunların hangi silahtan geldiğine ilişkin tespitler uzun süredir göz yardımı ile yapılmaktadır. Son 30 yıl içerisinde ise bilgisayar destekli görüntüleme ve inceleme araçları ile daha güvenilir ve hızlı sonuç üretilmesi konusunda pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir (Thompson, 1999; Chu ve diğerleri, 2010). Adli balistik çalışmalarında teslim alınan bir silah ile merminin ilişkilendirilmesinde kullanılan bu genel prensip, ilgili silahın namlusunun dökümü esnasındaki kalıp bozukluklarının ve daha sonrasında da silah bakımı esnasında eklenen ilave bozuklukların sebep olduğu karakteristik yapının, o silahla atılan mermi çekirdeklerinde oluşan izler kullanılarak modellenmesine dayanmaktadır. Ateşleme karakteristiği modeli de denilen bu

model elde edildikten sonra, hangi silahtan çıktığı bilinmeyen mermi çekirdeklerinin üzerindeki izlerle modelin eşleşip eşleşmediğine bakılarak olay yerinde hangi silahın kullandığı tespit edilmesi mümkün olmaktadır.

Kameralarda da, görüntünün üzerindeki kalıntıların arasındaki benzerlikler kullanılarak kaynak kamera tespiti yapılabilmesi mümkün olabilmektedir.

Bununla birlikte, sayısal bir görüntü oluşurken görüntüye eklenen her kalıntı kaynak kameranın tespiti için uygun değildir. Bu kalıntılardan bazıları belirli bir üreticinin belirli bir dönemde ürettiği tüm kameralarda ya da belirli bir model ismi altında ürettiği tüm kameralarda yer aldığı için ancak belirli bir üreticiye ya da belirli bir modele kadar kaynak takibi yapılmasına izin vermektedir. Bu gibi izler ile yapılan sınıflandırmalar ilişkin literatürde "Kaynak Marka ve Model Sınıflandırma" adı altında incelenmektedir.

Kaynak Kamera Tanıma yöntemleri (KKT) ise kaydedilmiş görüntülerin belirli bir tek kamera cihazı ile çekilip çekilmediğini tespit etmektedir. Yani aynı marka ve modeldeki pek çok cihaz arasında dahi, tek bir cihazın tespit edilmesi mümkün olabilmektedir.

Bu gibi yöntemler, adli balistik alanında silah tespiti yöntemine benzer özellikler göstermektedir. Temel olarak tek bir cihaza has, eşsiz kamera karakterinin ilgili cihazla üretilen görüntülerden elde edilmesine ve daha sonrasında da cihazın ürettiği sıradan çıktılar ile (görüntüler) eşleştirilmesine dayanmaktadır. Bu çalışmalar a) kamera sensörü üzerinde biriken tozların, b) sensör üretimi esnasında oluşan ve "soğuk" ve "sıcak" olarak isimlendirilen pikseller, c) sensör yarıiletkeninin üretimi esnasında oluşan ve sensörün tümünde bulunan hataların, kamera ile üretilen görüntüler üzerinden analiz edilmesine ve eşleştirilmesine dayanmaktadır. Aşağıda maddeler halinde bu üç tür yaklaşıma ilişkin literatür özetlenecektir.

2.1.1 Sensör Tozları

DSLR olarak tabir edilen tipteki kameralar, "body" ve "lens" olarak adlandırılan iki ana parçadan oluşmaktadır. Kullanıcı çekmek istediği sahnenin niteliğine göre lensler tercih edebilmektedir.Örneğin küçük nesneleri fotoğraflarken makro lensler tercih edilirken,

manzara çekimlerinde ise geniş açılı lensler tercih edebilmektedir. Ek olarak yüksek optik yakınlaştırmaya müsade eden lenslerin kullanılması da mümkün olabilmektedir. Farklı lensler arasında geçiş yapılırken kamera sensörünün önünde bulunan cam parçasına havada bulunan tozlar yerleşmekte ve oluşan görüntülerde küçük lekelere sebep olmaktadır. Araştırmacılar bu sensör tozlarının tespitine ve eşleştirilmesine yönelik olarak fiziksel bir model geliştirmişlerdir ve bunu başarılı bir şekilde DSLR kameralarda tanınmasında uygulamışlardır (Dirik ve diğerleri, 2007; Olivier, 2008). Zira kameralarda yer alan tozların tamamının temizlenmesi her zaman mümkün olmamakla beraber, bu tozların bazılarının temizlik sonrasında dahi sensör camı yüzeyinde kalıcı çiziklere sebep olabildiği bilinmektedir.

Önerilen bu yöntem oldukça başarılı bir KKT yöntemi olmasına karşın, yalnızca lensi değiştirilebilen (DSLR ve türevi) kameralarda kullanılabilmektedir.

2.1.2 Sıcak ve Soğuk Pikseller

Sensör üretimi esnasında karşılaşılan hatalardan iki tanesi, "sıcak" (sürekli yüksek gerilim üretir) ve "soğuk" (sürekli düşük gerilim üretir) olarak tabir edilen bozuk piksellerdir. Bu bozulmalar yarı iletken ile devre arasındaki kopukluklardan, katkılama esnasındaki hatalardan veya yarı iletkenin fiziksel olarak darbe görmesinden kaynaklı olabilmektedir. Bu hatalara sahip sensörler üretim sonrasında kalite kontrol aşamasında incelenir ve hatalı piksel sayısının görüntü çözünürlüğüne göre oranına göre fiyatlandırılır ve kamera üreticileri tarafından uygun değerlere sahip olanları kullanılır. Araştırmacılar 20 adet kamera ile yaptıkları deneylerde yukarıda anlatılan iki tipteki bozuk piksellere dayalı bir KKT yöntemi önermişlerdir (Geradts ve diğerleri, 2001). İlgili deney kapsamında, araştırmacılar, iki farklı markanın kataloglarında bulunan 20 kameradan 12 tanesi bir markanın "ucuz" bir modeli, 8 tanesi ise başka bir markanın "pahalı" diğer bir modeli ile fotoğraf çekimi yapmıştır. İlginç bir şekilde ucuz kameralarla yapılan deneylerde elde edilen görüntülerde en az 8 adet pikselin hatalı olduğu da görülmüştür. Ayrıca, tek bir cihaz ile elde edilen farklı görüntülerde bu hatalı piksellerin yerlerinin değişmediği, buna karşın kameradan kameraya hatalı piksellerin konumlarının rastgele değiştiği bulgularına varılmıştır, ki böylece hatalı piksel pozisyonlarından ilgili görün-

tüyü çeken kameranın hangisinin olduğunun bulunması mümkün olabilmektedir. Bunun yanı sıra, sıcaklık ile bu bozuk piksellerin görünürlüğü arasında bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

Yöntemin KKT amaçlı kullanımındaki kısıtlılığı ise, düşük piksel hatalı sensör kullanılan kameralarda ölçüm yapılamaması ve hatalı piksellerin görünürlüklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik göstermesidir. (Geradts ve diğerleri, 2001).

2.1.3 Örüntü Gürültüleri

Bir sensörde yer alan her bir pikselin kendine özel bir cevap aralığı bulunmaktadır. Yani, aynı miktar ışığa maruz kalan piksellerin her birinin aynı gerilimi üretmesi söz konusu değildir. Bu cevap aralığı, sensör üretim tekniğinin hassasiyetine göre değişmekle beraber üretim sürecinin doğal bir sonucudur ve hangi tipte olursa olsun kamera sensörlerinde kaçınılmaz olarak bulunmaktadır. Her bir pikselin cevap aralığının değişiyor olması ise, bu farklılıklardan tam olarak kurtulunmasını imkansız hale getirmektedir. Bu durum ise, adli bilişim açısından her bir kamera sensörü için bu tip gürültülerin bir çeşit "sensör parmak izi" olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu şekilde kullanışlı olan sensör parmak izleri, "örüntü gürültüsü" olarak tabir edilen bir sensör gürültü tipine karşılık gelmektedir. Örüntü gürültüleri sensörlerde iki çeşittir. Bunlardan birincisi, "sabit örüntü gürültüsü", ötekisi ise bir sonraki başlıkta daha detaylıca ifade edilecek olan ve tez süresince üzerinde durulacak "birörnek olmayan ışık cevabı" (Photo-Response Non-Uniformity) gürültüsüdür. Literatürde sabit örüntü gürültüsü "FPN", birörnek olmayan ışık cevabı ise "PRNU" şeklinde kısaltılmaktadır ve tez kapsamında da bu kısaltmalar kullanılacaktır.

FPN, çalışır konumdaki bir sensörün ısınmadan dolayı, tam karanlık altında dahi, pikselden piksele farklı değerler üretmesinden kaynaklanmaktadır. Bu gürültü, sensörün ürettiği işaretten bağımsızdır ve bu işaretin üzerine eklemeli olarak binmektedir. Bu tip gürültünün azaltılması için sensör paketindeki ısı üreten devre elemanları sensörden izole edilebilmektedir. Bu tip gürültünün azaltılmasında kullanılan bir diğer ve daha yaygın uygulama ise, sensör köşelerinde yer alan ve ışık alması fiziksel olarak

engellenen karanlık piksellerin ürettiği gerilim değerlerinin ortalamasının, aktif, yani ışık alan piksellerin piksellerin ürettiği gerilim değerinden çıkartılmasıdır. Yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda ise sensör ısınının takip edilmesi, termoelektrik soğutucu gibi devre elemanlarının eklenmesi ve kamera yazılımına karanlık ortamda kalibrasyon özelliğinin eklenmesi gibi ek tedbirler uygulanmaktadır (Holst, 1998). Lakin bütün bu tedbirlere karşın pikselden piksele değişim gösteren bu tip gürültünün tam olarak kaldırılması mümkün olamamaktadır.

FPN tipi gürültünün KKT amaçlı kullanımı ise kameralı video kaydediciler için 1999 yılında açıklanmıştır (Kurosawa ve diğerleri, 1999). Bu çalışmada, araştırmacılar, 4 farklı modeldeki 9 adet video kamera (ing. camcorder) ile yaptıkları deneylerde, analog tabir edilen 8mm bir video kamera haricinde başarılı bir şekilde KKT işlemini gerçekleştirmişlerdir. Kameraların parmak izlerinin çıkartılması için önerilen usül, karanlıkta tutulan kameralar ile (araştırmacılar bunu kamera lensini örterek gerçekleştirmişlerdir) 100 çerçevelik video kaydının gerçekleştirilmesi ve daha sonra çerçevelerin ortalamasının alınmasından ibarettir. Bu durumda araştırmacılar, her bir cihazın kendisine özel bir FPN örüntüsüne sahip olduğunu görmüşlerdir.

Bu çalışmada önerilen yöntem, KKT literatürü açısından, yani kamera cihazı bazında KKT yapılması bakımından ilk yöntemi teşkil etmektedir. Buna karşın oldukça sınırlıdır, zira bu yöntemle kamera tespitinin gerçekleştirilmesi için karanlık ortamda ilgili kamera ile en az 100 adet görüntünün elde edilmesi gerekmektedir. Bu ise ancak ve ancak kameranın ilgili analizi yapacak uzmanın elinde olması durumunda elde edilebilecek bir bilgidir, çünkü kullanıcıların tam bir karanlıkta bu sayıda fotoğraf çekmeleri veya bu fotoğrafları kayıt cihazlarında tutmaları makul değildir.

PRNU ise diğer tip örüntü gürültüsüdür. FPN'den farklı olarak sensör boş iken (karanlıkta) değil, yük altında iken (ışık ulaşmakta iken) her bir pikselin aynı miktar ışığa karşın farklı bir gerilim üretmesinden kaynaklanmaktadır. PRNU gürültüsünün fiziksel sebepleri arasında, sezimleyici boyutu farklılıkları, spektral cevap, katman kalınlıklarındaki farklılıklar sayılmaktadır (Holst, 1998).

PRNU'dan faydalanılan ilk KKT çalışması, 2006 yılında gerçekleştirilmiştir (Lukáš ve diğerleri, 2006). Çalışmada, PRNU'ya dayalı yöntemin FPN'e karşı avantajı olarak, normal (yani kamera lensi kapatılmadan elde edilen) sahneler kullanılarak kameranın PRNU parmak izinin elde edilebildiği ve bu tip gürültünün sık kullanılan görüntü işlemlerine karşı dayanıklı olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, FPN'ye kıyasla görüntünün tamamına yayıldığı ve bu sayede korelasyon işlemi ile niceliklendirilebilen KKT yapılabildiği belirtilmiştir.

PRNU'nun bu belirgin avantajları sayesinde, bu yöntem çerçevesinde oldukça zengin bir KKT literatürü oluşmuştur.

2.2 PRNU-izi tabanlı KKT

Kaynak görüntüleme cihazının tespiti konusunda Lukas ve arkadaşları, kamera sensörlerinde meydana gelen PRNU tipi örüntü gürültüsünden yararlanarak bir ilinti sezimleyicisi tanımlamış ve PRNU-izi tabanlı bir kaynak cihaz tespiti yöntemi önermişlerdir (Lukáš ve diğerleri, 2006). Daha sonrasında aynı araştırmacı takımı tarafından yöntem daha da iyileştirilerek geniş ölçekli bir teste tabi tutulmuş ve "tepe-ilinti enerji oranı" (ing. peak-to-correlation energy ratio) olarak adlandırılan (bundan böyle "PCE" olarak kısaltılacaktır) yeni bir sezimleyici önerilmiştir (Goljan ve diğerleri, 2009). Öncesinde önerilen ilinti sezimleyicisine (Lukáš ve diğerleri, 2006) kıyasla PCE sezimleyicisi, görüntü boyutuna bağlı olmadığı için daha dengeli bir test istatistiğidir ve bir milyon tane görüntü için yanlış ret adeti iki bin; yanlış kabul ise üç adet civarındadır (Goljan ve diğerleri, 2009).

Analitik biçimdeki görüntü oluşumu modelinde PRNU gürültü örüntüsü çarpımsal bir bozucu etki olarak ifade edilmektedir (Chen ve diğerleri, 2008).

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 + (\mathbf{I}_0\mathbf{F}) + \Phi \tag{2.1}$$

Denklemde, $\mathbf{I}$ bir görüntünün her bir noktası için gözlenen ışık yoğunluğunu, $\mathbf{I}_0$ ise görüntü sensörüne ulaşan ışık şiddetini göstermektedir. Yine denklemde, $\mathbf{F}$ PRNU gürültü

örüntüsünü, Φ ise shot gürültüsü, okuma (read-out) gürültüsü, kara akım (dark current) gürültüsü ve aralıklandırma (ing. quantization) gürültülerinin toplamını ifade etmektedir. Görülebileceği üzere, PRNU gürültü örüntüsü ile sensöre ulaşan görüntü çarpılarak oluşan görüntüye etki etmektedir. Bu $\mathbf{F}$ terimi $\mathbf{I}$ üzerinde yapılan gürültü kestirimi ile tahmin edilebilmektedir (Chen ve diğerleri, 2008). İdeal koşullar altında, görüntüleme sensörünün PRNU örüntüsü kontrollü bir çevrede, kalibre edilmiş ışık kaynakları altında oluşturulan sahnelerden elde edilmelidir. Fakat $\mathbf{I}_0$ ve $\mathbf{F}$'ye ilişkin gerçek değerlerin ölçümü gerçek hayatta uygulanabilir bir KKT uygulaması dahilinde mümkün değildir. Buna karşın PRNU gürültü örüntüsünün tahmin işlemi en yüksek olabilirlik kestiricisi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu en yüksek olabilirlik olabilirlik kestirici şu şekilde ifade edilmektedir (Goljan ve diğerleri, 2009):

$$\hat{\mathbf{F}} = \frac{\sum_{j=1}^{K} \mathbf{N}_\mathrm{j} \mathbf{I}_\mathrm{j}}{\sum_{j=1}^{K} \mathbf{I}_\mathrm{j}^2} \tag{2.2}$$

Denklemde, K adet görüntü $\mathbf{I}_1$, $\mathbf{I}_2$,...,$\mathbf{I}_\mathrm{K}$ ile elde edilen aynı sayıda gürültü kullanılmaktadır. Örneğin bir j.ci görüntüden ($\mathbf{I}_\mathrm{j}$) elde edilen gürültü, $\mathbf{N}_\mathrm{j}$ ile gösterilmektedir. Burada bahsi geçen gürültü, uzamsal olarak uyarlamalı dalgacık-tabanlı gürültü temizleyicisi (WDF) ile üretilmektedir (Mihcak ve diğerleri, 1999). Gürültüler, eldeki bir j.ci görüntüden, gürültüsü temizlenmiş halinin WDF($\mathbf{I}_\mathrm{j}$) farkının alınması ile elde edilmektedir. Bu işlem esnasında, tek bir kameradan geldiği bilinen görüntüler kullanılmaktadır.

PRNU gürültü örüntüsü kestiriminde özel olarak belirtilmemesine karşın, renkli görüntüler söz konusu olduğunda, her bir renk kanalı için gürültüler ayrı ayrı çıkartılmakta, daha sonrasında bilinen gri-düzey dönüşüm katsayıları kullanılarak bu gürültüler birleştirilmektedir (Goljan ve diğerleri, 2009).

KKT işlemi için ise, kaynağı bilinmeyen görüntüden elde edilen gürültü ile, ilgili kameranın PRNU gürültü örüntüsü kestirimi arasındaki benzerlik ölçülmektedir. Bunun için normalize çapraz korelasyon ölçütü kullanılmaktadır (Goljan ve diğerleri, 2009).

$$\rho(s;\mathbf{N},\hat{\mathbf{F}}) = \frac{\sum_{l=1}^{L}(\mathbf{N}[l]-\overline{\mathbf{N}})(\hat{\mathbf{F}}[l+s]-\overline{\hat{\mathbf{F}}})}{\|\mathbf{N}-\overline{\mathbf{N}}\|\|\hat{\mathbf{F}}-\overline{\hat{\mathbf{F}}}\|} \tag{2.3}$$

Burada, L görüntüdeki toplam nokta sayısını göstermektedir ve s çembersel kaymaların adetidir. Bilindiği üzere korelasyon ölçütü veri boyutuna bağlı olarak çeşitli aralıklarda değer üretmektedir ve uygulamada kolaylık sağlayacak bir eşik değeri ile bu benzerliğin değerlendirilmesi için korelasyon matrisinin işlenerek PCE adı verilen bir ölçütünün kullanılması önerilmektedir (Goljan, 2009).

$$\mathrm{PCE}(\mathbf{N},\hat{\mathbf{F}}) = \frac{\max(\rho)^2}{\frac{1}{L-\varepsilon}\sum_{l=1,\ldots,L\notin\varepsilon}\rho[l]^2} \underset{H_1}{\overset{H_0}{\lessgtr}} \tau \tag{2.4}$$

Bu simgelem altında, H_1, bir $\mathbf{Y}$ görüntüsünden elde edilen $\mathbf{N}$ gürültüsünün, PRNU gürültü örüntüsü $\hat{\mathbf{F}}$ olan bilinen bir kamera ile eşleştiğini göstermekte iken, H_0 ise sıfır hipotezini göstermektedir. Denklem (2.4)'de bulunan ε değeri, normalize edilmiş çapraz korelasyon matrisinin en yüksek değerinin komşuluğunda yer alan az sayıdaki (10 tane) korelasyon değerini ifade etmektedir. τ değerinin ise KKT uygulamalarında 40 yahut 50 olarak seçilmesi önerilmektedir (Goljan ve diğerleri, 2009).

2.3 PRNU-izi tabanlı KKT'ye yönelik karşı çalışmalar

PRNU-izi tabanlı kaynak tespiti metodu karşısında yapılan deneysel çalışmalarda genel olarak iki ardışık aşama izlenmektedir: (i) Kaynak tespitini engellemek (kaynağı gizlemek), (ii) Kaynak tespitini yanıltmak (görüntü kaynağını taklit etmek). Literatürde PRNU-izi tabanlı kaynak tespitini engellemek için "düz yüzeyleştirme" adlı bir işlemin uygulanması önerilmiştir. Ancak araştırmacılar düz yüzeyleştirme işleminin geniş ölçekte uygulanmasında sorunlarla karşılaşmıştır (Gloe ve diğerleri, 2007). Önerilen düz yüzeyleştirme işlemi çok sayıda görüntü üzerinde uygulamaya müsait değildir, zira kullanılan bütün çekim parametrelerinin hedef görüntü ile eşleştirilmesi gerekmektedir. Bunun için de (i) ilgili görüntüleme cihazına erişmek, (ii) özel ışıklandırılmış ortamlarda çekim yapmak ve (iii) belli bir biçimde kayıt yapmak gibi şartlara uyulması gerekmek-

tedir. Bu şartlar altında gerçekleştirilen düz yüzeyleştirme işlemi ile PRNU-izi düşük bir seviyeye indirgenebilmekte ancak kamera tespiti çok az sayıda görüntü için engellenebilmektedir (Gloe ve diğerleri, 2007).

PRNU-izi tabanlı kaynak tespiti metodunun görüntü işleme yazılımlarında sunulan görüntü işlemleri karşısındaki gürbüzlüğü de literatürde incelemelere konu olmuştur (Rosenfeld ve Sencar, 2009). Bu çalışmalarda gürültü temizleme (denoising), JPEG sıkıştırma gibi işlemler denenmiş ve PRNU-izinin KKT'yi engelleyecek şekilde yeterince zayıflatabilmesi için uygulanan işlemlerin görüntü kalitesini önemli derecede bozması gerektiği gösterilmiştir. Bu denli bir bilgi kaybı meydana getirilmediğinde JPEG sıkıştırma, gürültü temizleme, boyut küçültme gibi işlemler PRNU-izinin tespitini engelleyememektedir.

Literatürde yer alan bir diğer yöntem ise, Bilgi Güvenliği alanı kapsamındaki çeşitli uygulamalarda "klonlama" olarak tabir edilebilecek bir yöntemin KKT alanında bir uygulamasıdır (Steinebach ve diğerleri, 2010). Araştırmacılar cep telefonu kameraları ile elde edilmiş görüntüler için PRNU tabanlı KKT'yi atlatacak (yahut yanıltacak) bir "parmak izi kopyalama" yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem, bir cep telefonu (örneğin A cihazı) için PRNU-izinin elde edilmesi; ardından bu PRNU-izinin başka bir cep telefonu (örneğin B cihazı) ile çekilmiş bir görüntüye kopyalanmasından ibarettir. Bu yöntem sonucunda, başka bir cep telefonu (B) ile elde edildikten görüntüde iki adet parmak izi bulunmakta ve ilinti sezimleyicisi görüntünün (B) telefonu yerine (A) telefonu ile çekildiği sonucunu üretmektedir.

Rainer ve arkadaşları, düz yüzeyleştirme ve parmak izi kopyalama yöntemlerinin arka arkaya uygulanması yaklaşımının birlikte kullanılmasını önermişlerdir (Böhme ve Kirchner, 2013). Bunun için de (i) iki görüntüleme cihazına da erişmek, (ii) iki görüntüleme cihazı ile özel ışıklandırılmış ortamlarda çekim yapmak gibi bazı şartlara uyulması gerekmektedir. Aksi takdirde PRNU-izinin silinmesi mümkün olamamaktadır.

Bu karşıt çalışmalar karşısında, PRNU tabanlı KKT yöntemini geliştiren araştırmacılar PRNU-izi ile kaynak tespiti metodunun halen geçerliliğini koruduğunu "Üçgen testi"

(triangle test) adı verilen bir karşılaştırma deneyi ile ortaya koymuştur (Goljan ve diğerleri, 2010b; Goljan ve Fridrich, 2013). Üçgen testi, kaynak tespitini yanıltma amaçlı olarak görüntü oluşturma çabasının mevcut olması halinde, bu çabayı ortaya çıkartmak için önerilmiştir ve yanıltma çabalarının kaynak tespiti yöntemi ile tespit edilmesinin ve ortaya çıkartılmasının üçgen testi yapılarak mümkün olduğu gösterilmiştir.

Dolayısı ile şu an PRNU-izini silerek veya zayıflatarak (A) kamerası ile çekilmiş bir görüntünün kaynağını belirsizleştirmek veya başka bir (B) kamerası ile çekilmiş gibi göstermek mümkün görünmemektedir.

2.4 PRNU-izi ile gerçekleştirilebilen diğer uygulamalar

PRNU tabanlı KKT kısmında anılan uygulamalar tam çözünürlükteki bir görüntüden elde edilen, küçük bir görüntü parçası için de uygulanabilmektedir. Araştırmacılar bu noktadan hareketle hangi görüntü parçasının da ilgili kamera ile çekilmemiş olduğunun tespit edilebileceğini, böylelikle görüntü içeriğine yapılan kimi müdahalelerin görüntünün neresinde yapıldığının da belirlenebileceğini ileri sürmüştür. Bu kapsamda 2008 yılında yayınlanan ilk çalışmada, bir görüntü parçasının aydınlık miktarı ve dokusal değişintisi, düzlüğü gibi pek çok özelliği ile, PRNU parmak izi ile korelasyonu arasında doğrusal olarak ilişkili olduğu gösterilmiş ve bir doğrusal korelasyon önkestiricisi modellenmiştir (Chen ve diğerleri, 2008). Doğrusal önkestirici ile, görüntü üzerinden küçük parçalar pencere kaydırma ile taranmakta, ve her bir küçük parça için elde edilen önkestirim ile, ölçülen PRNU benzerliği arasında kayda değer bir fark bulunması halinde, ilgili küçük parçanın müdahale görmüş olduğu varsayılmaktadır. Lakin az sayıda piksel üzerinde yapılan müdahalelerin tespitinde bilgi miktarının eksikliğinden kaynaklı olarak zorluklar yaşanmaktadır. Chiercia ve arkadaşları 2011 yılındaki çalışmalarında, bu zorlukların aşılması ve müdahalelerin daha iyi tespit edilebilmesi için, görüntü içeriğine göre bölütleme yapılmasını ve bu bölütlerin yer aldığı kısımdaki kamera PRNU parmak izi ile, ilgili görüntü bölütünden elde edilen gürültü arasındaki korelasyonun incelenmesini önermiş ve önerilerinin başarımını ideal koşullar varsayımı altında (müdahale yapılan bölgenin tam olarak bölütlenebildiği durumu dikkate alarak) incelemiştir (Chierchia ve diğerleri, 2011). Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, mü-

dahale görmüş görüntüler, görüntünün içerisinden rasgele yerlerde seçilen yarıçaptaki daire bölgesinde yer alan piksellerin, görüntü içerisindeki başka bölgelere kopyalanması ile oluşturulmuştur. Önerilen yöntemin başarımı, Chen ve arkadaşlarının ilksel yöntemine (Chen ve diğerleri, 2008) göre oldukça yüksektir, ancak müdahale gören alanın tam bölütlenebilmesi varsayımının genellenmesi pek çok zaman mümkün olamamaktadır. Bu konuda daha güncel bir çalışma ise 2017 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada araştırmacılar, tek bir görüntünün, farklı boyutlarda analiz edilmesini ve bu analizlerin sonuçlarının birleştirilmesine yönelik bir yöntem önermiştir (Korus ve Huang, 2017). Böylece, büyük boyutlu pencereler kullanıldığında atlanılan küçük müdahalelerin tespit edilmesi, ve yalnızca küçük boyutlu pencereler kullanıldığında ortaya çıkan yanlış tespit sorunlarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

PRNU tabanlı KKT uygulamalarında kameralardan elde edilen PRNU parmak izlerinin rasgele yapısı nedeniyle iyi bir şekilde sıkıştırılabilmeleri mümkün olamamaktadır. Bu da büyük ölçekli uygulamalar için oldukça büyük miktarda kayıt alanı kapasitesi gerektirmekte ve dosyaların işleme alınma sürelerini uzatmaktadır. Araştırmacılar, bu gibi maliyetleri düşürmek adına PRNU parmak izinin daha az miktar veri ile ifade edilebileceği bir yöntem geliştirmişlerdir (Bayram ve diğerleri, 2012). Önerilen yöntem kapsamında her bir piksele ilişkin PRNU parmak izi 1 bitlik veri ile ifade edilmektedir. Bu sayede parmak izinin kayıt alanında kapladığı boyut %98 civarında düşürülebilmesine karşın, hata oranının yalnızca %1 ila %5 oranında arttığını göstermişlerdir.

PRNU tabanlı KKT'nin bir diğer kullanımı ise sentetik görüntülerin tespitine yöneliktir (Debiasi ve diğerleri, 2018). Pasaport ve kimliklerde insan gözü yardımı ve bilgisayar destekli olarak gerçekleştirilen, basılı fotoğraf ile kişinin yüzünün eşleştirilmesi işleminin yanıltılmasında "dönüştürülmüş yüz" (ing. morphed face) adı verilen bir sahtecilik yönteminin tespitinde PRNU tabanlı KKT kapsamındaki gürültünün kullanılması önerilmiştir. Bir dönüştürülmüş yüz fotoğrafı ile, birden fazla kişinin biyometrik görüntüleri birleştirilerek, bu kişilerin hepsinin aynı sahte kimlik belgesi ile gümrük kontrol noktalarından geçebilmesi mümkün olabilmektedir. Araştırmacılar, dönüştürülmüş yüz fotoğraflarının PRNU-izinin, orijinal fotoğraflardan daha farklı bir dağılıma sahip

olduğunu göstermiş ve buradan hareketle PRNU gürültüsünün bu tip sahtecilik yöntemlerinin tespitinde kullanılabileceğini ileri sürmüştür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilen adli bilişim yöntemleri ve bu yöntemlerin sınandığı materyal anlatılacaktır. Geliştirilen yöntemler adli bilişim literatürünün eksik kaldığı alanlara hitap etmektedir. Bunlar, i) sayısal görüntülerin kaynak cihazının gizlenmesi (kısaca "anonimleştirme"), ii) kaynak kameranın gizlemeye yönelik işlemlerden "Yama-Eşleştirme" (kısaltma YE) isimli işlemin uygulanmış olduğu sayısal görüntülerden kaynak kamera tanıma (kısaca, "karşı anonimleştirme"), iii) geometrik dönüşüme uğratılmış görüntülerde kaynak kamera tanıma yöntemleridir. Bu tez çalışmasının yapıldığı tarih itibariyle, bahsi geçen yöntemlerden ilki, ilgili alanda en yüksek başarımı sağlamaktadır. İkincisi, KKT karşıtı bir anonimleştirme yöntemi olarak kullanılan YE yöntemi ile işlenmiş görüntülerde, KKT yapılmasına yönelik olarak adli bilişim literatüründe önerilen ve başarımı incelenen tek çalışmadır; üçüncüsü, birleştirilmiş görüntülerde KKT uygulamalarına yönelik ilk çalışmadır.Bu bölümün devam eden kısımlarında gerçekleştirilen yöntemler detaylı bir şekilde yukarıda verilen sıra takip edilerek açıklanacaktır.

3.1 Uyarlamalı PRNU temizleme yöntemleri

Bu bölümde, PRNU gürültüsünün kaldırılmasına ilişkin olarak önerdiğimiz yöntem anlatılmaktadır. Anlatım esnasında verilen işlemler, aksi belirtilmedi ise, eleman-eleman matris işlemi olarak gerçekleştirilmektedir.

3.1.1 Kuramsal Model

PRNU gürültüsü ve kamera görüntü çıktısı arasındaki ilişki, Denklem 2.1 kullanılarak modellenecektir. İlgili denklemde $\mathbf{F}_x\mathbf{I}_0$ ifadesi PRNU terimini, Φ_1 rastgele durağan sensör gürültüsünü göstermektedir. PRNU tabanlı KKT yöntemi karşısında görüntü anonimleştirilmesi için, sensör çıkış modelindeki PRNU terimi sıfır olmalıdır. $\mathbf{I}_x$ imgesinde var olan sensör gürültüsü tahmininin iki boyutlu zaman bölgesi Wiener gürültü kaldırma filtresi Ω (Lim, 1990) ile gerçekleştiğini varsayalım. Bu durumda görüntünün kendisinden, gürültüden arındırılmış versiyonu çıkarıldığında $\mathbf{N} = \mathbf{I}_x - \Omega(\mathbf{I}_x)$ ifadesi ile tanım-

lanan kamera sensör gürültü kestirimi yapılabilir. Görüntü modelindeki PRNU terimi $\mathbf{F}_x\mathbf{I}_o$ ile diğer gürültü terimlerinin (Φ_1) gürültü giderme işlemi uygulandıktan sonra belli oranda bastırıldığı ancak tamamen kaybolmadıkları varsayılmaktadır. Sonuç olarak sensör gürültü kestirimi $\mathbf{N}$ i oluşturan terimler PRNU-izinin zayıflatılmış bir kısmı ve rastgele diğer gürültü kaynaklarından oluşur ve aşağıdaki şekilde modellenebilir:

$$\mathbf{N} = b\mathbf{F}_x\mathbf{I}_0 + \Phi_2 \tag{3.1}$$

Burada $b < 1$ (zayıflatma katsayısı) ve $var(\Phi_2) < var(\Phi_1)$ olmak üzere, N ifadesinde mevcut olan PRNU terimini kaldırmak için gürültü kalıntısı $\mathbf{N}$ sabit bir β katsayısı ile çarpılır. Bu çarpımın sonucu, I_x görüntüsünden çıkartıldığında,

$$\mathbf{I}_x^{'} = \mathbf{I}_x - \beta N \tag{3.2}$$

ifadesi elde edilir. Denklem 3.2 genişletilip tekrar yazıldığında,

$$\mathbf{I}_x^{'} = \mathbf{I}_0 + (\mathbf{F}_x\mathbf{I}_0 + \Phi_1) - \beta(b\mathbf{F}_x\mathbf{I}_0 + \Phi_2) \tag{3.3}$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemdeki terimler PRNU terimi etrafında düzenlenir ise,

$$\mathbf{I}_x^{'} = \mathbf{I}_0 + (1 - \beta b)\mathbf{F}_x\mathbf{I}_0 + (\Phi_1 - \beta\Phi_2) \tag{3.4}$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte, $\mathbf{I}_x^{'}$ imgesinde yer alan ve $\mathbf{F}_x\mathbf{I}_0$ ile ifade edilen PRNU teriminin etkisini yok edecek β teriminin,

$$\beta_0 = 1/b \tag{3.5}$$

olduğu görülmektedir. Denklemler 3.4 ve 3.5), $\mathbf{I}_x^{'}$ imgesinin gürültü terimi ile kamera

PRNU-izi $\mathbf{F}_x$'i birbiri ile ilintisiz yapan pozitif bir β katsayısının var olduğunu göstermektedir. PRNU terimi zayıflatma faktörü b değeri 1'den küçük olduğu için β katsayısı birden büyüktür ($\beta \geqslant 1$). PRNU terimini kaldırma sürecini anlatırken 2-boyutlu Wiener filtresini (Ω) kullanmamıza rağmen, önerilen yöntem farklı gürültü giderme algoritmaları ile de kullanılabilir (örneğin Wavelet tabanlı gürültü kaldırma algoritması). Önerilen yöntemde, zaman bölgesi Wiener Filtresi, PRNU gürültüsünün bastırılması işleminin KKT yönteminden (Goljan ve diğerleri, 2009) farklı olarak, değişik gürültü giderme filtreleri ile anonimleştirmenin gerçekleştirilebileceğini göstermek için seçilmiştir.

3.1.2 Görüntü Kalitesinin Analizi

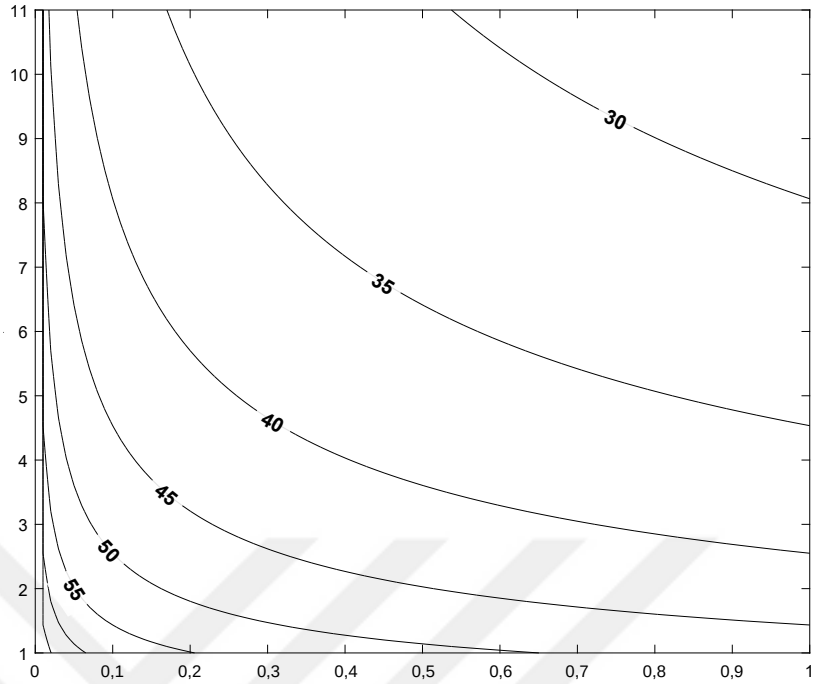
Anonimleştirme işlemi sonucu oluşan görüntü kalitesi β ve Φ_2 değerleri üzerinden hesaplanabilmektedir. Denklem 3.4'deki PRNU terimi, belirlenen β katsayısı ile sıfır değerini alıyorsa da, ilgili işlem $(-\beta\Phi_2)$ teriminden görüldüğü üzere, görüntüye gürültü eklemekte ve görüntü kalitesini düşürmektedir. $\mathbf{I}_x$ görüntüsünün anonimleştirme işlemi ile elde edilen $\mathbf{I}_x^{'}$ halininin PSNR değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\mathrm{PSNR}(\mathbf{I}_x^{'}, \mathbf{I}_x) = 10\log_{10}(255^2) - 10\log_{10}(var(\mathbf{F}_x\mathbf{I}_0) + \beta^2 \mathrm{var}(\Phi_2)) \tag{3.6}$$

PRNU gürültüsünün Sinyal Gürültü Oranı değeri yaklaşık olarak -50 dB ya da daha azdır ve imge kalitesine etkisi çok düşük olduğu için ihmal edilebilir (Goljan ve Fridrich, 2008) Bu ihmal yapıldığında Denklem (3.6) şu şekilde sadeleşir:

$$\mathrm{PSNR}(\mathbf{I}_x^{'}, \mathbf{I}_x) \approx 10\log_{10}(255^2) - 10\log_{10}(\beta^2 \mathrm{var}(\Phi_2)) \tag{3.7}$$

Basitleştirilmiş görüntü kalitesi modeline göre, $var(\Phi_2) = 0,5$ ve $\beta = 3$ olduğu durumda anonimleştirilmiş görüntünün PSNR değeri 41,60 dB olmaktadır. Denklem 3.7 ve Şekil 3.1 de görülmektedir ki β ve Φ_2 parametreleri PSNR değerini doğrudan etkilemektedir.

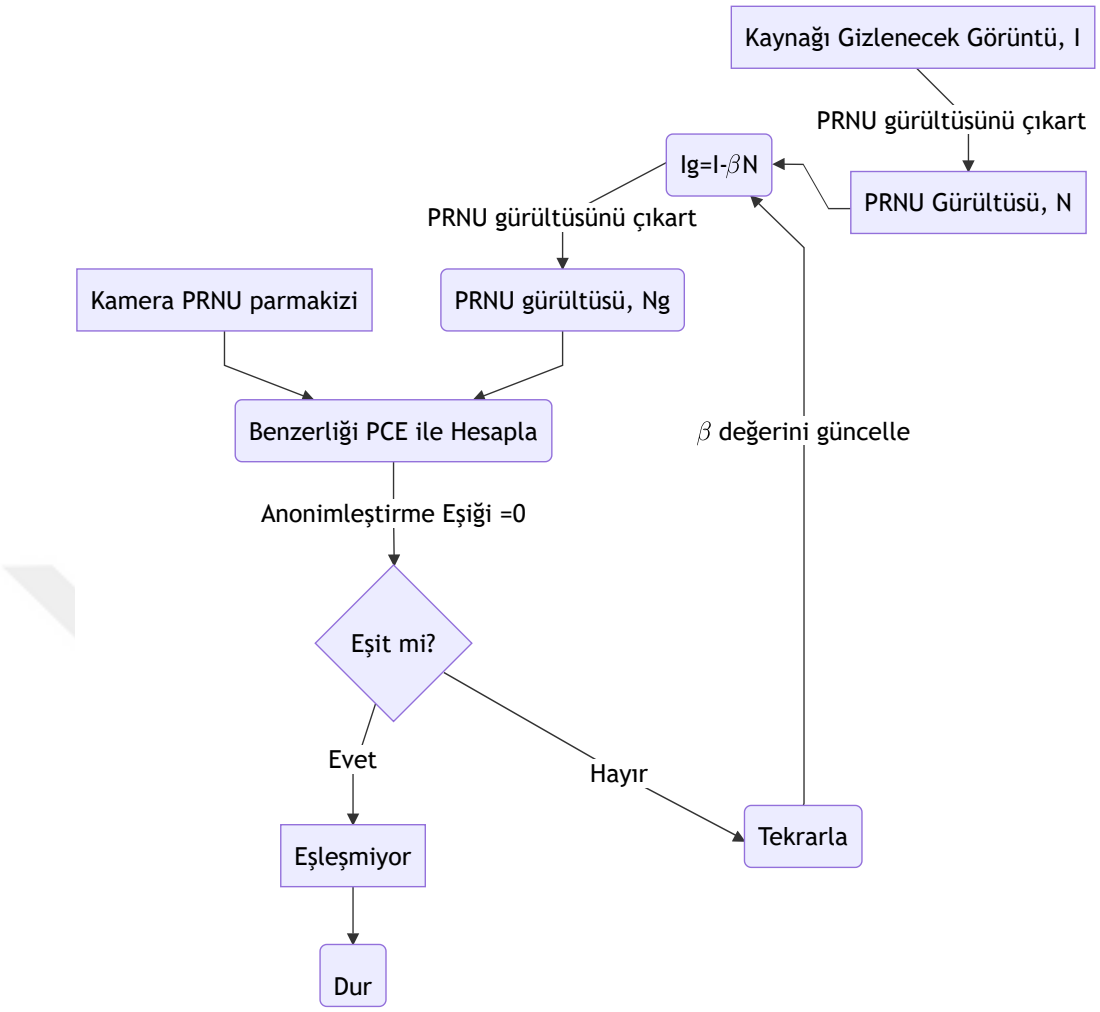


Şekil 3.1. Basitleştirilmiş görüntü kalitesi modeline göre, görüntü kalitesinin (PSNR [dB]), yatay eksende $var(\Phi_2)$ (PRNU harici gürültülerin gücü) ve dikey eksende β (PRNU gürültü gücü katsayısı) değerlerine karşın değişimi. Konturlerdeki rakamlar PSNR seviyelerini göstermektedir. Şekile sığmayan kontur değerlerinden, en yükseği 65, sonraki 60 dB değerindedir. Örneğin $\beta = 2$ bulunduğunda, görüntünün diğer güçlerinin varyansı 0,1 ise, 50 ile 55 dB arasında bir PSNR seviyesine erişilebilir.

Örneğin Φ_2 değerinin azalması halinde daha yüksek PSNR değeri oluşmaktadır. Bu da bize PRNU-tabanlı görüntü anonimleştirmesinin, gürültü giderme algoritmasının performansına bağlı olarak görüntü kalitesini etkileyeceğini göstermektedir. Bir sonraki bölümde β katsayısının PRNU-izi $\mathbf{F}_x$ ve PCE değeri kullanılarak nasıl hesaplanacağı gösterilecektir.

3.1.3 Önerilen Yöntemin Uygulanması ve Başarım Kriteri

Görüntü kaynağının anonimleştirmesindeki temel yaklaşım Denklem 3.3'deki PRNU teriminin kaldırılmasıdır. Önceki bölümde gösterildiği gibi, hedef görüntüde yer alan ve kaynak kamerayı tanımlamakta kullanılan PRNU örüntüsünün kaldırılmasından sonra hedef görüntünün karar eşiğinden düşük bir PCE değeri vermesi beklenilmektedir. Düşük PCE değerini elde etmek için, hedef görüntü için kestirilen β katsayısının ne kadar iyi olduğunu ölçecek iteratif bir PRNU kaldırma yöntemi tanımlanacaktır. Kestirilen



Şekil 3.2. Önerilen Yöntem Akış Diyagramı

katsayının sağladığı anonimizasyon derecesini ölçmek için PCE değeri kullanılmaktadır. $\mathbf{I}_x^a$ nihai anonimleştirilmiş görüntüyü, $\mathbf{I}_x^{'}(\beta)$ terimi hedef I görüntüsünün PRNU teriminin β katsayısı ile zayıflatılmış halini simgelemektedir. Anonimleştirme sürecinin anlatımı için, PCE değeri, β katsayısının ve ilgili katsayı ile üretilmiş $\mathbf{I}_x^{'}$ görüntüsünün bir fonksiyonu olarak Denklem 3.8'deki gibi tanımlanır. Ayrıca önerilen yöntemin çalışması, akış diyagramı şeklinde Şekil 3.2'de verilmektedir.

$$f_{\mathrm{PCE}}(\beta) = \mathrm{PCE}(\mathbf{I}_{\mathbf{x}}^{'}(\beta), \hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{x}}) \tag{3.8}$$

$\mathbf{I}_x^{'}(\beta)$ görüntüsü, Denklem 3.2 ile hesaplanmaktadır. Burada esas amaç $f_{\mathrm{PCE}}(\beta)$ değerini sıfır yapacak β katsayısını bulmaktır. Genel bir PRNU gürültü yok etme yöntemi için,

katsayıyı analitik olarak hesaplamak zordur. Bu nedenle, $f_{\mathrm{PCE}}(\beta)$ ifadesi bir optimizasyon fonksiyonu olarak tanımlanacak ve global minimumu, β katsayısı ile aranacaktır. Bu arama şöyle ifade edilebilir:

$$\beta_o = \underset{\beta \in [1,\infty)}{\arg\min}(f_{\mathrm{PCE}}(\beta)) \tag{3.9}$$

İfadede, β_o, $\mathbf{I}_x$ görüntüsünün PRNU gürültü kestirimi için bulunan en iyi katsayıdır. Denklem 3.9'da görüldüğü gibi en iyi β_o katsayısının tam değerini bulmak her zaman mümkün olmayabilir. KKT karşısında anonimizasyonun amacı KKT yönteminin eşleşme olarak belirlediği durumu, eşleşmeyen durum haline getirmek olarak basitleştirilebilir. Bu işlem Denklem 3.10'deki koşul ile ifade edilebilir:

$$f_{\mathrm{PCE}}(\beta_a) \leq \varepsilon_a \tag{3.10}$$

İfadede, ε_a anonimleştirmeye ilişkin kararın verildiği bir eşik değeridir ve PRNU tabanlı KKT'nın PCE değeri olarak belirlediği 50 değerine, yahut uyumsuz yani eşleşme olmadığı bilinen herhangi bir küçük değere ayarlanabilir. Böylece, KKT yöntemi ile, I_x görüntüsünün işlenmesi ile elde edilen I_x^a görüntüsünün X kamerasından mı, yoksa bir Y kamerasından mı çekildiğine karar verilmesi engellenmiş olur.

$$\mathbf{I}_x^a = \mathbf{I}_x - \beta_a(\mathbf{I}_x - W(\mathbf{I}_x)) \tag{3.11}$$

Bu nedenle, en iyi (optimum) β_O katsayısını bulmak yerine Denklem 3.11'de verildiği gibi anonimleştirilmiş $\mathbf{I}_x^a$ görüntüsü üretmek için KKT işlemini engelleyecek optimuma yakın herhangi bir β_a çözümü kullanılabilir. Anonimizasyon işleminden sonra, PCE değeri oldukça azalacağından, $\mathbf{I}_x^a$ görüntüsü X kamerası ile ilişkilendirilemeyecektir. Denklem 3.10'deki koşul verilen M tane anonimleştirilmiş imge seti için anonimizasyon başarı oranını (ABO) hesaplamak için kullanılabilir.

$$\text{ABO}(\varepsilon_a)= \frac{100}{M}\sum_{i=1}^{M} \text{S}(i;\varepsilon_a); \text{S}(i;\varepsilon_a) = \begin{cases} 1 & \text{eğ.} \quad f_{\text{PCE}}(\beta_a(i)) \leq \varepsilon_a; \quad \text{i=1,..,M} \\ 0 & \text{dig.} \end{cases} \tag{3.12}$$

İfadede, $\beta_a(i)$ bir i.ci fotoğraf için anonimleştirme faktörü olarak adlandırılır. Eğer ε_a değeri yeterince küçük bir karar eşiği olarak (örn. $\varepsilon_a = 49$) seçilir ise, Denklem 3.12 bir M adet fotoğraftan oluşan set için KKT'nin çalışmama oranını (ing. miss rate) verir ve KKT yöntemine karşı bir ölçü olarak kullanılır.

3.1.4 Gürültü Giderme Algoritmalarının Yöntem Başarımına Etkisi

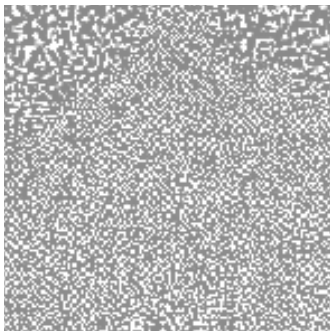
Bölüm 3.1.1'de, zaman bölgesi Wiener gürültü giderme algoritmasının önerilen yöntemde kullanımı anlatılmış ve bu gürültü giderme algoritmasının yerine başka algoritmaların da tercih edilebileceği belirtilmişti. Gürültü giderme algoritmasının tercihinde, daha hızlı yakınsama sağlanması bakımından PRNU gürültüsünü daha çok ayırt edebilen bir algoritmanın tercih edilmesi ve görüntü kalitesi bakımından ise görüntü içeriğinin daha az barındıran bir algoritmanın tercih edilmesinin anonimleştirme yöntemine katkı sağlayacağı açıktır. Bu nedenle, bir farklı gürültü giderme algoritmasının daha yöntem kapsamında kullanımı incelenecektir. Bunun için, öncesinde bu değişikliğin ne gibi faydalar sunabileceği incelenmiştir.



(a) Görüntü ($\mathbf{Y}$)



(b) $\mathbf{N_W}$, PCE($\mathbf{N_W}, \hat{\mathbf{F}}$): 1661, SSIM($\mathbf{N_W}, \mathbf{Y}$): $0,47$



(c) $\mathbf{N}_\Omega$, PCE($\mathbf{N}_\Omega$,$\hat{\mathbf{F}}$): 2360, SSIM($\mathbf{N}_\Omega$,$\mathbf{Y}$): $0,25$

Şekil 3.3. Gürültü giderme algoritmalarının kalıntı çıktıları. Ortada, zaman bölgesi Wiener ($\mathbf{N_W}$), sağda wavelet bölgesi gürültü giderme algoritmasının çıktıları $\mathbf{N}_\Omega$ bulunmaktadır. Solda orijinal görüntü ($\mathbf{Y}$) yer almaktadır. Gürültü kalıntılarının daha iyi görülebilmesi için karşıtlık seviyeleri arttırılmıştır.

Şekil 3.3'de zaman bölgesi Wiener gürütü giderme algoritması ile Wavelet bölgesi gürültü giderme algoritmasının çıktıları kıyaslanmaktadır. Bu kıyas, 1) PRNU benzerliği bakımından PCE ölçütü ile, 2) içerik benzerliği bakımından SSIM (ing. structural similarity index) ölçütü ile yapılmıştır. Görüldüğü üzere, Wiener algoritması ile elde edilen gürültüde, ağaç yüzeyi ayırt edilebilmektedir; buna karşın Wavelet tabanlı algoritma ile elde edilen gürültü kalıntısında görüntü yüzeyini ayırt etmek mümkün olamamaktadır. Yaptığımız bu gözlem, SSIM olarak bilinen ve görüntülerin arasındaki yapısal benzerliğe ilişkin bir ölçüt kullanılarak ölçülmüştü ve ilgili alt şekillerin altında ölçülen değerler belirtilmiştir. Bu ölçümlere göre, zaman bölgesinde çalışan gürültü algoritması ile elde edilen gürültü kalıntısı, dalgacık bölgesinde elde edilen gürültü kalıntısına oranla neredeyse iki kat kadar görüntü içeriği barındırdığı anlaşılmaktadır. Bu durumda anonimleştirme fonksiyonu Denklem 3.13 ve oluşan görüntünün modeli ise Denklem 3.14'da verilmektedir.

$$\beta \approx \underset{\beta \in [1,\infty)}{\arg\min} \Big(\mathrm{PCE}\big(\mathbf{Y} - \beta(\mathbf{Y} - \Omega(\mathbf{Y})), \hat{\mathbf{F}}\big) \Big) \tag{3.13}$$

$$\mathbf{Y}^{'} = \mathbf{Y} - \beta(\mathbf{Y} - \Omega(\mathbf{Y})) \tag{3.14}$$

Gürültü kalıntıları arasındaki PRNU içeriği ise KKT yönteminde de uygulanan PCE ölçütü ile ölçülmüştür. Burada ise, dalgacık bölgesinde yapılan gürültü işlemi ile elde edilen PRNU örüntüsü diğerine oranla %40 daha fazla olmuştur.

Burada dalgacık bölgesi gürültü giderme algoritması şeklinde ifade edilen algoritma, dört bileşenli Daubechies 8 uzunluklu dalgacık dönüşümü kullanılmaktadır (Mihcak ve diğerleri, 1999). Daha verimli olduğu gözlemlenen bu algoritma değişikliği ile görüntülerin kamera PRNU parmak izi ile olan ilintisinin daha da azaltılması ve görüntü kalitesinin korunması hedeflenmektedir. Tezin Bulgular kısmında 4.2, bu iki algoritmanın yöntem dahilinde nasıl bulgulara sebep verdiği anlatılacaktır. Önerilen yöntemin Wiener filtresi ile gerçekleştirilen uygulaması, "ÖY-1"; Wavelet filtresi tabanlı uygulaması ise "ÖY-2" ismi ile anılacaktır.

3.1.5 Yöntem Parametreleri ve Rakip Yöntemler

Önerilen yöntemlerde test görüntüsü ve kamera PRNU parmak izi, Denklemler 3.9 ve 3.13'de gösterildiği şekilde döngü içerisinde tanımlanabilen bir dizi işlemden geçmektedir. Bu işlemler esnasında gürültü kalıntısı bir başlangıç $\beta_i = 1$ değeri ile çarpılıp, test görüntüsünden çıkartılmaktadır ve oluşan görüntü depolama cihazına en yüksek kalitede kaydedilmektedir. Görüntü daha sonrasında tekrar okunup hafızaya alınmakta ve bu görüntüden elde edilen gürültü kalıntısı ile kaynak kamera PRNU parmak izi $\mathbf{F_{init}}$ arasındaki benzerlik PCE cinsinde ölçülmektedir. Eğer herhangi bir (i.nci) döngüde ölçülen benzerlik, karar eşiğinin üstünde ise, bu sefer $\beta_{i+1} = \beta_i + (\beta_i - \beta_{i-1})/100$ alınarak bir sonraki döngüye girilmektedir. Herhangi bir k.ıncı döngüde elde karar eşiğinin altında PRNU benzerliğine sahip bir görüntü elde edildiğinde, ilgili katsayı β_k etrafında daha hassas bir şekilde arama devam etmektedir. En düşük PRNU benzerliğinin elde edildiğinde arama işlemi durdurulur. En düşük benzerliğin üretildiği $\beta_x, x \geq k$ ile, test görüntüsünün aslı ve bu görüntüden elde edilen gürültü kalıntısı kullanılarak yöntem çıktısı olan anonimleştirilmiş test görüntüsü kaydedilir. ÖY-1 ve ÖY-2 için yukarıda anlatılan uygulama, gürültü kalıntısının eldesinde kullanılan gürültü çıkartımı algoritmaları haricinde, aynı işlemlerden mütevellittir.

düz yüzey düzeltmesi uygulaması, uzay gözlemevlerinde bulunan özel teleskopik lensli kameralarla elde edilen uzay gözlemlerine ilişkin görüntülerde sıklıkla kullanılan bir kalibrasyon yöntemidir (Jager ve diğerleri, 1975; Currie ve diğerleri, 2014). Bu gibi kameralarda görüntüler üzerinden yüksek hassasiyetli ölçümlerin yapılabilmesi için görüntüdeki pek çok gürültü ile birlikte sensör örüntülerinden kaynaklı gürültülerin de arındırılması gerekmektedir. Ancak bu hassasiyetteki düzeltme işlemlerinde kamera sensöründen elde edilen ham görüntü verisinin yanı sıra, sensör sıcaklığı gibi pek çok yan ölçümden faydalanılabilmektedir. Bu mevcut uygulamadan ilham alınarak, düz yüzey düzeltmesinin adli bilişim literatüründe, PRNU tabanlı KKT karşıtı kullanımına ilişkin ilk öneri 2006 yılında yapılmıştır (Lukáš ve diğerleri, 2006). Literatürdeki daha sonraki çalışmalarda ise, bu yöntemin PRNU tabanlı KKT karşısındaki kullanımı incelenmiş ve düz yüzey düzeltmesi yönteminin tüketici seviyesi kameralar için bu amaçla

nasıl kullanılacağı anlatılmıştır (Gloe ve diğerleri, 2007).

Düz yüzey düzeltmesi için, tüketici seviyesi kameralarla iki farklı tipteki görüntünün her birinden, eşit sayıda L adet kadar çekim yapılması önerilmektedir.

$$\mathrm{k} = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}\mathbf{g}_{\mathrm{kara}}(\mathrm{i}). \tag{3.15}$$

Birinci tip görüntü, $\mathbf{g}_{\mathrm{kara}}$ ile ifade edilmektedir. Bu tip görüntü karanlık ortamda çekilmektedir, bunun için örneğin ilgili kameranın kapağı kapatılmakta ya da bir karanlık oda kullanılmaktadır. Bu görüntülerin ortalaması alınarak ilgili kameranın FPN kısmı kestirilmektedir. Denklem 3.15'de, i indisi ile de çekimi yapılan farklı görüntüler, $i = 1$'den L'ye kadar ifade edilmektedir. Kestirim sonucunda bir adet çerçeve k elde edilir. Bu çerçeve, karanlık çerçeve olarak adlandırılmaktadır.

İkinci tip görüntü ise, $\mathbf{g}_{\mathrm{ayd}}$ ile gösterilmektedir. Bu tip görüntünün kullanımı Denklem 3.16'de gösterilmektedir. Burada, aydınlık sahnelerden elde edilen görüntülerin ortalaması kullanılmakta, yalnız bu defa Denklem 3.15'de elde edilen karanlık çerçeve k, aydınlık görüntülerden eksiltilmektedir. Bu sayede düz çerçeve adı da verilen d elde edilmektedir. Aydınlık görüntü ($\mathbf{g}_{\mathrm{ayd}}(\mathrm{i}), i = 1,2,...,L$) olarak mümkün olduğu kadar eşit bir şekilde aydınlatılmış bir düz sahneden elde edilen görüntülerin kullanılması gerekmektedir.

$$\mathrm{d} = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}\mathbf{g}_{\mathrm{ayd}}(\mathrm{i}) - \mathrm{k}. \tag{3.16}$$

Düz çerçeveler elde edildikten sonra, düz yüzey düzeltmesi uygulamasının herhangi bir d görüntüsü için şu şekilde gerçeklenmesi önerilmektedir:

$$\hat{\mathrm{g}} = \frac{\mathrm{g} - \mathrm{k}}{\mathrm{d}}. \tag{3.17}$$

Denklem 3.17'de verilen işlem sonucunda elde edilmiş ĝ görüntüsüne düz yüzey düzelt-

mesi uygulanmış görüntü ya da düz yüzeyleştirilmiş görüntü adı verilmektedir (Gloe ve diğerleri, 2007).

Tüketici seviyesi kameralarla düz yüzey düzeltmesinin ideal koşullarda gerçekleştirilebilmesi için her bir kamera ayarı (ISO, enstantene hızları ve pozlama süresi gibi ayarların) ve çekimde kullanılacak her bir farklı lens ile elde edilen düz ve karanlık çerçevelerinin bulunması gerekmektedir. Bununla birlikte araştırmacılar tek bir ayar kümesi için düz yüzey düzeltmesi ile PRNU tabanlı KKT karşısında başarım elde ettiklerini belirtmektedir (Gloe ve diğerleri, 2007). Bununla beraber araştırmacılar deneylerinde yalnızca ham görüntülerle çalışmıştır, ki bu tip görüntülerin tüketici kameraları ile elde edilmesi pek nadiren mümkün olabilmektedir. Dolayısı ile bütün tüketici kameralarıyla elde edilebilen sıkıştırılmış görüntülerle bir başarımın elde edilip edilemeyeceği bilinmemektedir. Literatürdeki bu bilgi eksikliğini gidermek için, düz yüzeyleştirme için gereken iki tip görüntünün de yer aldığı kamuya açık bir görüntü veri tabanından yararlanılarak önerilen yöntemlerden ilki ile ayrı bir karşılaştırma yapılacaktır.

Li'lerin yöntemi ise önerilen yönteme diğer rakip yöntem olarak tercih edilmiştir (Li ve diğerleri, 2010). Bu yöntemle, önerilen yöntemler arasındaki temel farklılık, Li'lerin anlattığı yöntemde görüntüden kaynak kamera PRNU parmak izi $\mathbf{F_{init}}$'nin bir katsayı ile doğrudan çarpılarak çıkartılmasıdır ve bu işlem Denklem 3.18'de gösterilmektedir.

$$\mathrm{corr}\big((\mathbf{Y}-\beta\hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{init}}),\hat{\mathbf{F}}_{\mathbf{init}}\big)\approx 0 \tag{3.18}$$

Li'lerin yönteminin karşılaştırma amaçlı uyarlamasında, ilk önce bir $\beta_i=[0,\infty)$ katsayısı ile $\mathbf{F_{init}}$ çarpılmakta ve görüntüden çıkartılmaktadır. Ayrıca korelasyon ölçütü yerine daha güncel bir ölçüt olan PCE ölçütü kullanılmaktadır. İşlem sonucunda oluşan görüntü en yüksek görüntü kalitesinde kaydedilmektedir. Daha sonrasında, bu görüntü tekrar okunup, gürültü artığı tekrar elde edilir ve bu gürültü artığı ile kaynak kamera PRNU parmak izi arasındaki benzerlik PCE cinsinden ölçülür. Önerilen yöntemlere benzer şekilde, eğer ölçülen PCE değeri karar eşiğinin üstünde kalıyorsa, bir sonraki döngüye $\beta_{i+1}=\beta_i+(\beta_i-\beta_{i-1})/100$ ile girilir. Önerilen yöntemlerle Li'lerin yöntem

arasındaki bu temel farklılığın, yöntemlerle oluşan anonimleştirilmiş görüntüler bakımından ne gibi farklılıklar doğurduğu Bölüm 4'de gösterilecek ve tartışılacaktır.

3.1.6 Deneylerde Kullanılan Görüntü Veri Tabanları

düz yüzey düzeltmesi uygulamasında ihtiyaç duyulan özel görüntülerin çekilmesi oldukça zahmetlidir. Özellikle eşit ışıkla aydınlatılmış sahnelerin oluşturulmasında özel aydınlatma elemanlarının veya ışığı homojen bir şekilde dağıtabilen filmlerin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle düz yüzey düzeltmesi ile önerilen yöntemlerin karşılaştırmasında kullanılacak görüntüler için bu gibi görüntüleri de barındıran ve kamuya açık olan bir veri tabanı kullanılacaktır. Bu veri tabanına ilişkin detaylı bilgiler Bölüm 4.1'de verilecektir. Bunun haricinde, önerdiğimiz yöntemlerin (ÖY-1 ve ÖY-2) Li'lerin yöntemine karşı başarımını sınamak için 5 adet farklı kamera ve cihazşa çektiğimiz görüntülerle oluşturulan bir görüntü veri tabanı kullanılmaktadır. Tez çalışmaları kapsamında hazırladığımmız bu görüntü veri tabanını oluştururken dikkate aldığımız ilkeler, benzer çalışmalarda yol gösterici olması için aşağıda belirtilmektedir:

1. Kayıpsız veya düşük kayıpla kaydedilmiş görüntüler: Yüksek kayıplı görüntü sıkıştırma algoritmalarının PRNU-izini yok etmediği bilinmektedir. Ancak kayıplı işlemler görüntü kalitesini düşürmekte ve PRNU-izini zayıflatmaktadır (Rosenfeld ve Sencar, 2009). PRNU-izinin yalnızca uygulanacak yöntem tarafından tarafından gerçekleştirildiğinden emin olmak ve kayıplı sıkıştırmanın önerilen yöntemin başarımına bir etkide bulunmasını engellemek için cihazın üretilmesine müsade ettiği en düşük kayıpla elde edilen görüntüler veri tabanına dahil edilmiştir.

2. Aynı coğrafyada ya da yakın tarihlerde çekilmiş görüntüler: Tüketici cihazları ile elde edilen görüntülerde dahili olarak görüntü çekim tarihi bulunmaktadır. Bazı cihazlar, özellikle akıllı cep telefonları, GPS yer koordinat bilgisini de görüntü dosyasındaki EXIF bilgileri arasına yerleştirmektedir. Bu ilke takip edilerek, çevresel koşullardan etkilenen sensör kaynaklı gürültülerin görüntü üzerindeki gürültü dağılımına yapacakları etki sabitlenecektir. Bu tercih, yöntem başarımının

doğru belirlenebilmesi için önemlidir. Tez kapsamında oluşturulan veri tabanında kullanılan görüntüleme cihazları ile elde edilen görüntülerin zaman ve mekan bilgileri görüntülerdeki GPS etiketleriyle kontrol edilmiş, bu sayede çevresel koşulların eşit olduğu ortamlarda çekim yapılması sağlanmıştır.

3. Bir görüntü işleme yazılımı ile işlenmemiş görüntüler: Paylaşılan görüntülerin çeşitli yazılımlar kullanılarak (örneğin, Adobe firmasının "Lightroom", "Photoshop", "Premiere" ve Apple firmasının "Final Cut" yazılımları gibi)[1] mahiyetinin önceden bilinmesi mümkün olmayan bazı işlemlerden geçirilmesi olasıdır. Bu gibi yazılımlarla yapılan işlemler görüntünün PRNU-izini yok etmemektedir, ancak kısmen zayıflatabileceği bilinmektedir ve PRNU-iz dağılım karakteristiğini bir miktar bozabileceği öngörülmektedir (Rosenfeld ve Sencar, 2009). Görüntülere yapılan, renk parlaklığını ve renk karşıtlığını değiştirmek gibi, salt-algısal müdahalelerin PRNU-izine nasıl bir etkisi olduğu bilinmemektedir. Ancak bahsi geçen yazılımlarla işlenmiş bir görüntünün her zaman bir kısım kayıpla tekrar kaydedildiği bilinmektedir. Bu durumun görüntülerin karşılaştırılacak kaynak gizleme (KG) yöntemlerinin başarımına istenmeyen bir olumlu etkide bulunabileceği öngörülmektedir. Tez kapsamında, kullanılan görüntüleme cihazları ile elde edilen veri tabanındaki görüntülere hiç bir görüntü işleme yazılımı ile müdahale edilmemiştir.

4. Kamera cihazının en yüksek çekim çözünürlüğü ile çekilmiş görüntüler: Görüntü boyutu genellikle sensör yüzey alanı ve sensör kalitesi gibi unsurlar dikkate alınarak bir üst sınıra sabitlenir. Üst sınır bilgisi genellikle üreticilerin belirttiği, "12 Megapixel", "720p" gibi tanıtıcı ibarelerle kullanıcılara aktarılır. Kullanıcılar çeşitli saiklerle, örneğin, sınırlı bir hafıza alanına daha çok görüntü kaydetmek gibi, bu üst sınırın altındaki ayarlarla görüntüleri kayıt edebilirler (örneğin en yüksek çözünürlüğü 12 Megapiksel olan bir cihazda 6 Megapiksel çözünürlükte kayıt yapılabilir). Bu durumun PRNU-izinin bütünlüğünü azaltan bir etki oluşturabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle veri tabanı oluşturulurken, kullanılan ciha-

[1] Tırnak içerisinde anılan ürünler belirtilen yazılım firmalarının tescilli markalarıdır.

zların çekim için imkan verdiği en yüksek çözünürlükler üreticilerin sundukları bilgiler ışığında önceden belirlenmiştir. Tez kapsamında, kullanılan görüntüleme cihazları ile elde edilen veri tabanındaki görüntüler ilgili görüntüleme cihazlarının en yüksek çözünürlük ayarları kullanılarak elde edilmiştir.

5. Aşırı parlak ya da aşırı karanlık olmayan görüntüler: 8 bit ile kodlanan görüntülerde en parlak kesimler 255, en karanlık kesimler ise 0 değerini alabilmektedir. Görüntüdeki parlak ve karanlık bölgelerin belirlenmesinde, oluşturulacak görüntünün anlaşılabilir olması için neredeyse bütün sayısal kameralarda "auto exposure" algoritmaları kullanılmaktadır. Bu işlem sonucunda yüksek parlaklığa sahip görüntü kısımlarına yüksek bir onluk değer (>240) atanırken, aşırı karanlık görüntü kısımlarına ise düşük bir değer (<10) verilmektedir. PRNU gürültüsünün bu gibi bölgelerden çıkartılması mümkün olmadığı için tez kapsamında, kullanılan görüntüleme cihazları ile elde edilen veri tabanındaki görüntülerde, görüntü çekilirken görüntüde aşırı parlak ve aşırı karanlık bölgelerin mümkün olduğunca az olmasına dikkat edilmiş ve sağlaması teker teker görüntüler incelenerek yapılmıştır.

3.2 Yama Eşleştirme Yöntemiyle Anonimleştirilmiş Görüntülerde KKT

Körce uygulanabilme imkanına sahip olan bir görüntü karıştırma yöntemi olan Yama Eşleştirme algoritması ile işlenen görüntülerden bilinen yöntemlerle KKT yapılamamaktadır. Önceki bölümlerden hatırlanacağı üzere, YE yöntemi, verilen bir görüntüde yer alan benzer görüntü parçalarının etkili bir şekilde tespit edilerek yerlerinin değiştirilmesine yönelik bir algoritmadır. Bu yöntemin, PRNU tabanlı KKT karşıtı kullanımında da, buna ilave olarak düşük değişintisi olan görüntü parçalarına bulanıklaştırma işlemi uygulanmaktadır. Bu bölümde, Yama Eşleştirme yöntemi ile (yöntem, kısaca YE olarak anılacaktır) işlenmiş görüntülerle KKT yapılabilmesi için geliştirdiğimiz yaklaşım anlatılacaktır.

3.2.1 İçerik müdahalesine dayalı anonimleştirme yöntemlerinin KKT karşısında durumu

Görüntü içerikleri, yani sahneler, doğaları gereği rasgele dağılım göstermektedir. Örneklemek gerekirse, bir gökyüzü görüntüsünde pek çok sayıda benzer parça yer almaktadır, lakin birden çok görüntünün erişilebilir olması halinde, görüntüler arasındaki benzer parçaların yerlerinin rasgele dağıldığı varsayılabilir.

Bu varsayım altında, YE ile işlenmiş ve anonimleştirilmiş görüntülerin ("YE görüntü" olarak anılacaktır) asıllarından farklılaşması incelenmiş ve Denklem 3.19 ile, YE görüntülerdeki bozulan piksel sayısının tüm görüntüye oranı ölçülmüş ve %55 ila %8 arasında değiştiği ve ortalamada %15 civarında olduğu görülmüştür.

$$\text{BPO}\ [\%] = 100 \times \frac{1}{R \times C} \sum_{r=1}^{R} \sum_{c=1}^{C} \text{sign}(|\mathbf{L}(r,c) - \mathbf{L}_{ye}(r,c)|) \tag{3.19}$$

Denklem 3.19'de BPO değeri bozulan piksel oranını, $\mathbf{L_{ye}}$ ile bir YE görüntü, $\mathbf{L}$ ile ise bu görüntünün aslı ifade edilmektedir. R ve C görüntünün satır ve sütun adetlerini ifade etmektedir. İfadede yer alan sign(), signum fonksiyonunu ifade etmektedir, lakin bu fonksiyonun 0'da ürettiği değer ihmal edilmektedir.

Bu durumda, YE görüntülerin içerisinde halen kamera PRNU işaretinin bulunduğu açıktır, lakin bu zayıf PRNU işareti ile KKT yapılabilmesi için birden çok YE görüntünün kullanılması gerekecektir. Bunun için, birden çok görüntüden oluşan bir "küme" den elde edilen zenginleştirilmiş PRNU gürültüsü ile, kaynak kameranın PRNU parmak izi arasında bağ kurulmasının mümkün olduğu gösterilecektir.

3.2.2 Saldırı Senaryoları ve Varsayımlar

Yöntemin devam eden anlatımında, tezin bu kısmına değin pek kullanılmamış olan "analizci" - "hasım" (ing. "analyst" - "adversary") çifti üzerinden bir dizi adli bilişim senaryosu işlenecektir, bu nedenle bu kısımda tez kapsamında kullanılacak bu iki kavram tanıtılacaktır. Burada analizci ifadesi ile, kaynağı sorgulanan görüntüler ile şüpheli kamera arasındaki ilişkiyi sorgulamakla görevli adli bilişim uzmanı ya da uzmanları

kast edilmektedir. Hasım ise, kaynağı sorgulanan görüntülere müdahale imkanı olan ve görüntüler ile doğru kaynak kamera tanıma yapılmasını engellemeyi amaçlayan bir veya birkaç kişiyi ifade etmektedir.

YE görüntülerden KKT yapılabilmesine ilişkin çerçeve senaryo şu şekildedir: Analizci, kaynağı sorgulanan görüntülerin çekildiğinden şüphelenilen tek kameranın PRNU parmak izini ($\mathbf{F}_{\mathrm{q}}$) belirli sayıda hiç-oynanmamış görüntüden elde edebilmektedir. Hasım ise, kaynağı sorgulanan görüntülerin KKT yapılabilmesinin önüne geçebilmek adına bir dizi tedbir uygulamıştır: görüntülerin üstverisini silmiş, YE algoritması ile kaynağı sorgulanan görüntüleri işlemiştir.

Analizci, kamera PRNU parmak izi'ni ($\mathbf{F}_{\mathrm{q}}$) elde ettikten sonra, bu parmak izi ile, kendisine iletilen bir depolama cihazındaki suçlayıcı her bir görüntünün şüpheli kameralardan hangisi ile çekilmiş olduğunu klasik PRNU tabanlı KKT yöntemleri ile tespit etmeye çalışmaktadır. Hafıza ortamındaki tüm görüntüler YE ile işlenmiş olduğu için, bu başarılı olamaz. Oysa, önerilen yöntemi kullanarak, bu görüntüleri kümelere ayırabilir ve birkaç şüpheli görüntüyü birlikte kullanarak doğru tespit şansını arttırabilir. Bulgular kısmında anlatılacağı üzere, yöntem kullanılarak şüpheli kamera ile çekilen en az bir YE görüntünün bulunduğu görüntü kümesini doğru bir şekilde tespit etme olasılığı bazı durumlarda %100'e çıkmaktadır.

Açıklanan senaryo çerçevesinde, iki alt senaryo incelenecektir. Senaryo #1'de, depolama cihazındaki tüm görüntülerin şüpheli kameradan çekilmesi ve aynı zamanda YE görüntü olması durumu incelenecektir. Senaryo #2'de ise, depolama cihazında üç tip görüntü şu oranlarda ve tiplerde yer almaktadır: i) %50 oranda şüpheli kamera ile çekilen YE görüntüler; ii) %25 oran kadarı şüphlenilmeyen bir kamera ile çekilen YE görüntüler; iii) geriye kalan kısmı ise yine şüphelenilmeyen bir kamera ile çekilen ve fakat YE ile işlenmemiş görüntüler.

Senaryo #1'de kullanılan görüntüler S_{α} ile ifade edilecek, senaryo #2'de yer alan görüntüler ise S_{Σ} ile ifade edilecektir.

Algoritma 1. Alt kümeler ve birleştirilmiş kümeler yordamıyla PRNU tabanlı KKT yapay kodu. Üst indisinde d bulunan satırlar yalnızca kontrollü deneylerde kullanılır, bilgi olmadığı durumlarda boş bırakılabilir. Algoritma içerisinde, **if** şartın kontrolünü, **for** ile sıralı döngüyü, **then** şart sağlandığında yapılan işlemleri, **do** döngü içerisinde gerçekleştirilecek işlemleri ve **return** işlem sonunda üretilen ve ana algoritmaya döndürülecek değerleri ifade etmektedir.

girdiler:
$\mathrm{X} \leftarrow$ depolama cihazındaki tüm görüntülerin listesi;
$K \leftarrow$ alt küme sayısı [100];
$\tau \leftarrow$ PCE cinsinden PRNU benzerlik eşik değeri (50 alınmaktadır);
$n \leftarrow$ alt küme eleman sayısı [5,10,15,20];
$q \leftarrow$ şüphelenilen kamera etiketi;
$\mathbf{F}_{\mathrm{q}} \leftarrow$ şüpheli kameranın PRNU parmak izi;
$o \leftarrow$ bilinmeyen kamera etiketi^{d};
$p \leftarrow q$ ve o değerlerine karşılık gelen durum numarası^{d};
$\mathrm{S}_{\alpha} \leftarrow q$ etiketli şüphelenilen kamera ile çekilen YE görüntülerin listesi^{d};
$\mathrm{S}_{\beta} \leftarrow o$ etiketli yabancı kameradan gelen YE ve orijinal görüntülerin listesi^{d};
$\Phi \leftarrow \varnothing$ boş küme;
$\mathrm{S} = \{\mathrm{X}_1, ..., \mathrm{X}_N\} \in \{\mathrm{S}_{\alpha} \cup \mathrm{S}_{\beta}\} \leftarrow$ tüm görüntüler (dosya yolları) ile doldurulur;
döngü:
for $k := 1$ *'den K'a kadar* **do**
  $\mathrm{S}_k \leftarrow n$ adet görüntü S kümesinden döngü içerisinde Denklem 3.21'e göre rasgele seçilir;
  $\mathbf{F}_k \leftarrow$GenerateFingerprint(S_k);
  $\rho_k \leftarrow \mathbf{F}_k$ ile $\mathbf{F}_{\mathrm{q}}$ arasındaki PCE değeri;
  if $\rho_k \geq \tau$ **then**
    $\Phi_p \leftarrow \Phi_p \cup \{\mathrm{S}_k\}$, görüntü dosya yollarını birleşme kümesine ekle;
    return k. alt kümeyi (S_k) ve PCE değerini (ρ_k);
if Φ_p *kümesi boş değil* **then**
  $\mathscr{F}_p \leftarrow$ GenerateFingerprint(Φ_p);
  $\rho_p \leftarrow \Phi_p$ ile $\mathbf{F}_{\mathrm{q}}$ arasındaki PCE değeri;
  return p. birleşme kümesi (Φ_p) ve PCE değeri (ρ_p);

3.2.3 Yöntem algoritması ve uygulamaya ilişkin detaylar

Anlatım esnasında, anlaşılırlık sağlaması adına, GenerateFingerprint(S) adlı bir yapay fonksiyon kullanılacaktır. Bu fonksiyon, $\mathrm{S} = \{\text{image1.png}, \text{image2.png}, ...\}$ gibi herhangi bir uzunluktaki S görüntü listesini giriş olarak kabul eder ve bu listedeki görüntüler ile Denklem 2.2'i kullanarak bir PRNU parmak izi üretir, bu şekilde, örneğin bir $\mathbf{F}_{\mathrm{S}}$ parmak izinin üretimi, $\mathbf{F}_{\mathrm{S}} = \mathrm{GenerateFingerprint}(\mathrm{S})$ ile gerçekleştirilir. Herhangi bir sebeple özel bir görüntü kümesi türünden bahsedilmesi gerekirse, küme isminin yanına

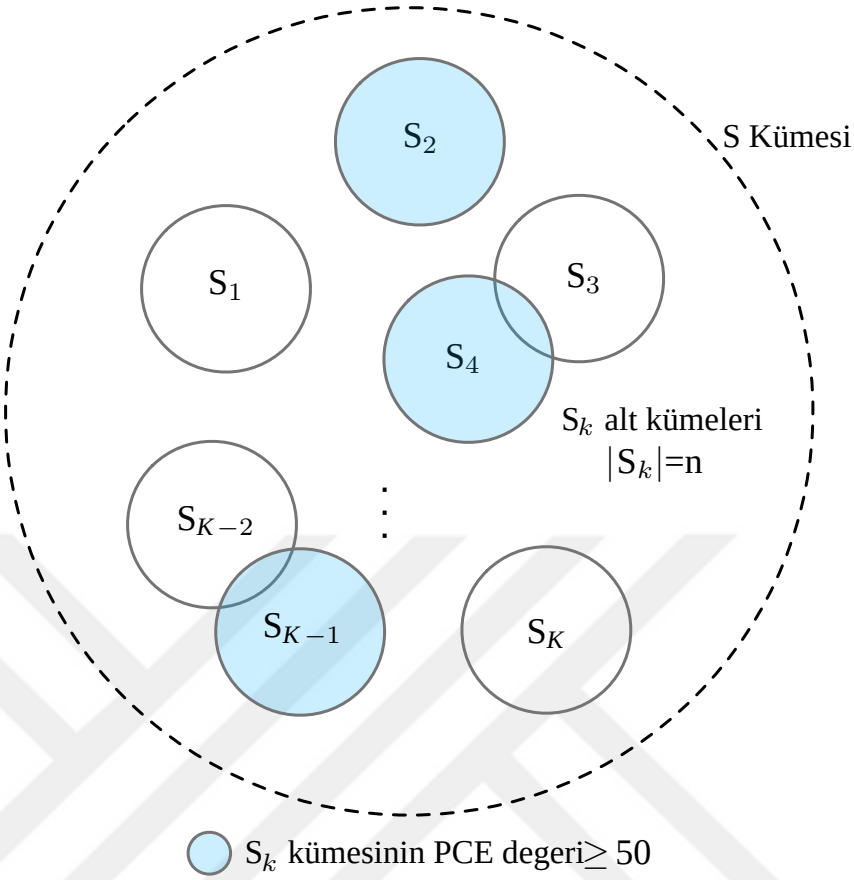
bir alt indis eklenir, örn. S kümesinin bir alt kümesi söz konusu ise, bu alt küme S_α ile anılacaktır.

Şüphelenilen kamera ile çekilmiş YE görüntüleri α alt indisi ile ifade edilirken, β analizci tarafından bilinmeyen bir kamera ile çekilmiş hem orijinal hem de YE görüntüleri ifade etmektedir. Bu iki tür görüntü kümesi birden kullanıldığı durumlarda ise Σ alt indisi kullanılmıştır. Benzer şekilde, "S kümesinin PCE değeri" ifadesi ile, herhangi bir dizi görüntünün yer aldığı, S kümesinde bulunan görüntülerle elde edilen bir PRNU parmak izi ile, şüpheli kameradan analizci tarafından elde edilen $\mathbf{F}_q$ PRNU parmak izi arasındaki benzerliğin PCE cinsinden değeri ifade edilmektedir ve bu ifade Denklem 3.20'de biçimsel olarak gösterilmektedir.

$$\text{"S kümesinin PCE değeri"} = \text{PCE}(\mathbf{F}_q, \mathbf{F}_S), \tag{3.20}$$

Alt kümeler için önerilen KKT yönteminin algoritması, Algoritma 1'de gösterilmektedir. Adli bilişim senaryoları, Bulgular kısmında (Bölüm 4.3) detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

YE görüntülerden KKT yapılabilmesi için akla gelen bir yaklaşım, verilen bir depolama cihazındaki tüm görüntüler için (varsayalım ki N adet görüntü yer alsın) bütün muhtemel kombinasyon sayısı kadar PRNU parmak izi üretmek ve sonrasında bu kombinasyonları analizcinin elindeki güvenilir PRNU parmak izi ile kıyaslamak olmaktadır. Lakin bu durumda $K = 2^N - 1$ adet parmak izi üretilmesi gerekecek ve daha sonrasında bunların benzerliğini ölçmek için yüksek işlem/süre maliyetli bir benzerlik değerlendirmesi yapmak gerekecektir. $N = 30$ aldığımızda, $1,07 \times 10^9$ adet PRNU parmak izi üretileceği düşünülebilir. Diğer taraftan, kombinasyonların adeti düşürülür ise, örneğin bu N adet görüntünün 20 adete kadar beşer artımlı (5,10,15,20) kombinasyonları alındığında ise, bu sayı, az önce ifade edilen toplam sayının beşte birine kadar düşecektir. Bu iki yaklaşımın da tek başlarına uygulanmalarının pratikte mümkün olmayacağı bellidir, zira $1920x1080$ gibi günümüz kameraları için düşük sayılabilecek bir görüntü boyutunda dahi her bir PRNU parmak izi 15MB kadar depolama yeri tutmak-



Şekil 3.4. Görüntü alt kümeleri

tadır, ki bu durumda bu tüm kombinasyonlarda parmak izi analizi yapılmak istendiği takdirde sırayla 14PB (petabayt) ve 3PB civarında bir depolama alanı gerekecektir.

Bu nedenle, çalışmamız dahilinde, tüm kombinasyonlar yerine, her deneyde en fazla 100 adet alt küme seçilmiştir ve kullanımımız Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen $K = 100$ adet alt küme, tüm görüntü kümesinden rasgele n kadar örnek seçilerek doldurulmaktadır. Bu alt kümelerin birbirileri ile kısmen örtüşmelerine müsade edilmektedir, lakin birbirine eşit alt kümeler oluşması durumunda, bu alt kümeler atılır ve yerlerine yeni bir rasgele seçim gerçekleştirilir. Bu müsade koşulu, analitik olarak herhangi iki S_i ve S_i alt kümesi için, Denklem 3.21'de gösterilmiştir.

$$S_i \neq S_j \Rightarrow \left| S_i \cap S_j \right| < n \tag{3.21}$$

S_i ve S_j alt kümeleri, Algoritma 1'de döngü içerisinde $|S_i| = |S_j| = n$ olacak şekilde doldurulmaktadır. Eğer bu alt kümelerden herhangi birinin F_q ile benzerliği (PCE cinsinden) 50 değerinde ya da daha fazla bulunursa, bu alt kümenin içeriği (görüntülerin dosya yolları) bir p. birleştirilmiş kümesi Φ_p'ye aktarılmaktadır. Döngü bitiminde, Φ_p kümesinin F_q ile benzerliği yine aynı ölçüt ile ölçülmektedir. PRNU benzerlik ölçütü eşiğinin 50 seçilmesinde ilgili literatür (Goljan ve diğerleri, 2009) temel alınmıştır.

3.2.4 Yöntemin Başarım Ölçütleri

Yöntem başarımını incelerken kullandığımız bazı ölçütler analitik ifadeleri ile birlikte bu bölümde açıklanmaktadır. "Geri çağırma" (ing. Recall) değeri, birleştirilmiş kümeye seçilen görüntülerin, kayıt ortamındaki tüm görüntülere sayısal oranını göstermektedir ve şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\text{Geri Çağırma (Recall) Oranı } [\%] = 100 \times \frac{|\Phi_p|}{|S_\alpha|}. \tag{3.22}$$

Doğruluk (ing. Precision) değeri ise, birleştirilmiş kümesinde yer alan görüntülerin kaç tanesinin sorgulanan kamera ile çekildiğinin oranını gösteren bir değerdir ve şu şekilde verilmektedir:

$$\text{Doğruluk (Precision) } [\%] = 100 \times \frac{|\Phi_p \cap S_\alpha|}{|\Phi_p|} \tag{3.23}$$

Doğruluk oranı ve geri çağırma oranı, tek kameranın bulunduğu Senaryo #1'de aynı değeri üretmektedir, zira Senaryo #1'de kayıt ortamında yalnızca sorgulanan kamera ile çekilmiş YE görüntüler yer almaktadır. Dolayısı ile Senaryo #1'de Geri çağırma oranı, Senaryo #2'de ise Doğruluk oranı ölçütleri ile ölçümler yapılacaktır.

"Seçilim" isimli ölçüt ise, kayıt cihazında yer alan görüntülerin kaçar adetinin birleştirilmiş kümede ifade edildiğinin (yani, seçildiğinin) oranını göstermektedir ve Denklem 3.24'da verilmektedir.

$$\text{Seçilim } [\%] = 100 \times \frac{\sum_{p \in \mathrm{C}} |\Phi_p|}{\sum_{p \in \mathrm{C}} |\mathrm{S}_\Sigma|} \tag{3.24}$$

"T.Geri Çağırma" (Toplam Geri Çağırma, ing. Total Recall) ve "T. Doğruluk" (Toplam Doğruluk, ing. Total Precision) ise önerilen yöntemin genel anlamda incelenen tüm kayıt ortamı dağılımları için nasıl başarım gösterdiğini daha önce yine Geri Çağırma ve Doğruluk ölçütlerini kullanarak, fakat $p \in \mathrm{C}$ üzerinden her bir durum için toplayarak göstermektedir. Burada C ile, 12 farklı kayıt ortamından her biri ifade edilmektedir ve C, 1 ila 12 arasında değer almaktadır. Bu ölçütler, saldırı senaryoları kısmında kısaca bahsedilen Senaryo #2'de, kayıt ortamının çeşitli durumlarına ilişkin bulguları durum bazlı analiz etmek için kullanılmaktadır ve sayısının 12 ile ifade edilmiş olmasının sebebi, kamera sayısı ve ilgili veri tabanının yapısı ile ilintilidir. Daha detaylı bilgi Bölüm 4.3.1'de verilecektir.

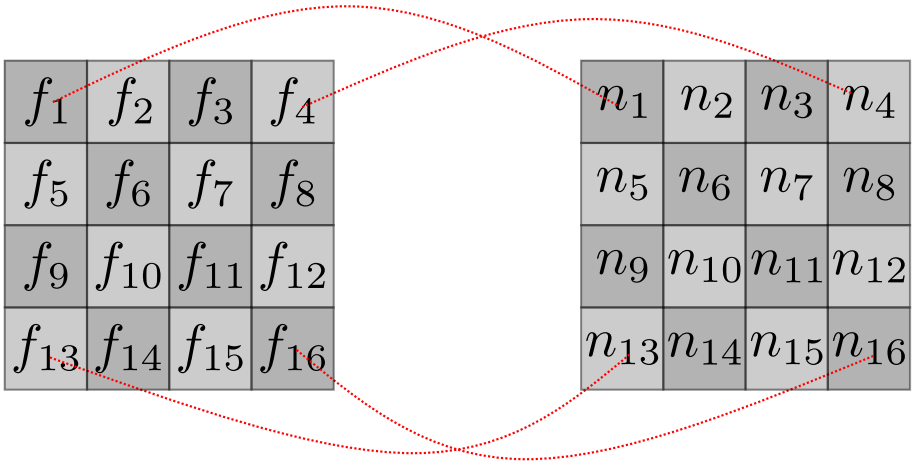
$$\text{Toplam Geri Çağırma (Recall) Oranı } [\%] = 100 \times \frac{\sum_{p \in \mathrm{C}} |\Phi_p \cap \mathrm{S}_\alpha|}{\sum_{p \in \mathrm{C}} |\mathrm{S}_\alpha|} \tag{3.25}$$

$$\text{Toplam Doğruluk (Precision) Oranı } [\%] = 100 \times \frac{\sum_{p \in \mathrm{C}} |\Phi_p \cap \mathrm{S}_\alpha|}{\sum_{p \in \mathrm{C}} |\Phi_p|}. \tag{3.26}$$

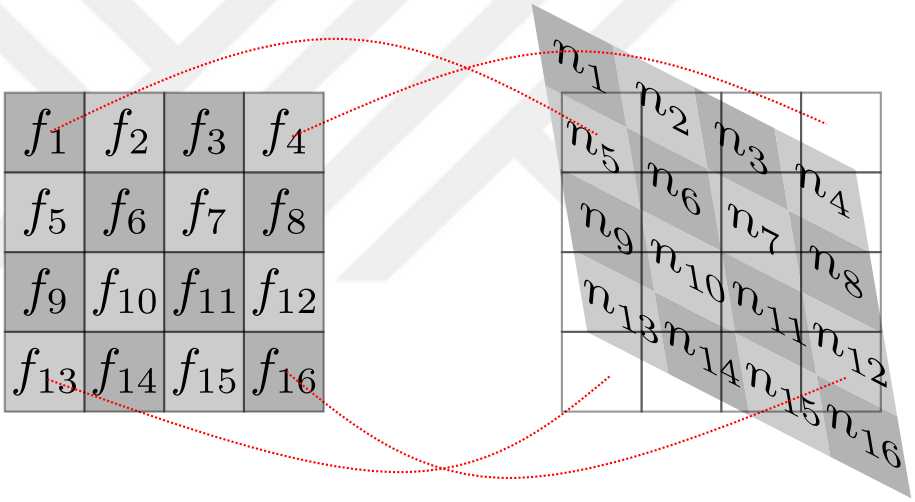
3.3 Geometrik Dönüşüme Uğramış Görüntülerle KKT

Bu bölümde geometrik dönüşüme uğramış görüntülerle nasıl PRNU tabanlı KKT yapılacağı anlatılacaktır. Hatırlanacağı üzere, PRNU tabanlı KKT için bir PRNU parmak izi ile, görüntüden elde edilen PRNU gürültüsü arasında Şekil 3.5'de temsilen gösterildiği gibi tam bir eşleşme olması gerekmektedir, geometrik dönüşüme uğramış görüntülerde ise bu mümkün olmamaktadır.

Geometrik dönüşüme uğramış görüntülerin nasıl elde edildiği, diğer bir deyişle, görüntü dönüşümü algoritmalarının nasıl çalıştığı Bölüm 4.4'de anlatılmıştır. Geometrik dönüşüm esnasında, kaynak görüntüye Şekil 3.6'de temsilen gösterildiği gibi bir dizi uzamsal (ing. spatial) görüntü dönüşümü uygulanır. Bu gibi dönüşümler, görüntü-



Şekil 3.5. Geometrik dönüşüme uğramamış görüntülerde PRNU tabanlı KKT. Solda, kamera PRNU parmak izi için bir temsili matris, solda ise görüntüden elde edilen PRNU gürültü kestirimi temsil eden matris yer almaktadır.Kesikli çizgiler ile gürültü ve kamera PRNU parmak izi arasında eşleşen dört köşe gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Geometrik dönüşüme uğramış görüntüden elde edilen PRNU gürültü kestirimi (sağda) ve kamera PRNU parmak izi (solda). Görüntü dönüşüme uğramış olduğu için, görüntüden elden PRNU gürültü kestirimi de dönüşüme uğramıştır. Kesikli çizgilerle eşleşmenin artık mümkün olmadığı dört köşe gösterilmektedir.

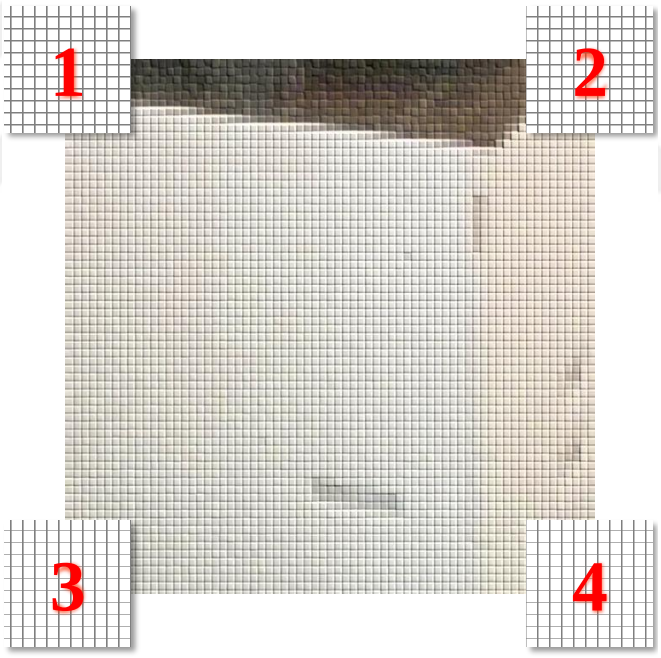
nün hizalamasını değiştirdikleri için parmak izi ile gürültü kestirimi arasındaki eşleşme bozulur ve artık bu görüntüden elde edilen PRNU gürültüsü ile, kameradan elde edilen PRNU parmak izi arasında ilişki kurulamaz hale gelir.

Tezde, geometrik dönüşüme uğramış görüntülerde PRNU tabanlı KKT yapılmasını incelemek üzere, projektif dönüşüm kullanılmıştır. Bilinmeyen bilinmeyen dönüşüm operatörü T ile; dönüşüm uygulanacak görüntü ise **I** ile gösterilmektedir. Parametreleri

bilinmeyen dönüşüm fonksiyonu T'nin elde edilebilmesi için, bir ızgara arama işlemi yapılması önerilmektedir.

Analizciye, yalnızca bir adet geometrik dönüşüme uğramış görüntü ve pek çok kameraya ait PRNU parmak izi birden verildiğinde, analizcinin erişebileceği herhangi bir bilgi bulunamamaktadır. Bu nedenle, basitleştirilmiş bir durum değerlendirilecek ve bu kapsamda analizcinin görüntüye uygulanan dönüşüme ilişkin bazı varsayımlarda bulunmasına ve kaynak kameraya ait PRNU parmak izine erişmesine müsade edilecektir.

Görüntü dönüşümlerinin PRNU tabanlı KKT üzerine olan etkisini incelemek için tezde kullanılan projektif dönüşüm, görüntünün her bir köşesine ($p; p = 1,2,3,4$), Şekil 3.7'de gösterildiği gibi yerleştirilen koordinat parametreleri $x(p), y(p)$ ile ifade edilmektedir ve Çizelge 3.1'de listelenmektedir.



Şekil 3.7. Köşe tutucu noktalarının gösterimi. Görüntü köşelerinde bulunan kutucukların içindeki rakamlar, p değerlerini göstermektedir. Her bir p'ye karşılık gelen bir koordinat çifti $x(p), y(p)$ ile ifade edilmektedir ve Çizelge 3.1'da gösterilmektedir.

Burada, $d_x(p), d_y(p)$ ile başlangıç piksel koordinatlarından sapılan piksel adeti, $E()$ ile bu sapılmalara bağlı olarak, kamera PRNU parmak izi **F** ile en yüksek normalize

Çizelge 3.1. Başlangıç durumu ve dönüşüm parametreleri.

	Başlangıç		Dönüşüm Parametreleri	
Köşe Tutucu (p)	$x(p)$	$y(p)$	$\hat{x}'(p)$	$\hat{y}'(p)$
$p=1$	0	0	$x(1)+d_x(1)$	$y(1)+d_y(1)$
$p=2$	0	1024	$x(2)+d_x(2)$	$y(2)+d_y(2)$
$p=3$	1024	0	$x(3)+d_x(3)$	$y(3)+d_y(3)$
$p=4$	1024	1024	$x(4)+d_x(4)$	$y(4)+d_y(4)$
Benzerlik	$E(0,0)$		$E(d_x(p),d_y(p)), p=1,2,3,4.$	

edilmiş çapraz korelasyon değerini gösteren fonksiyon ifade edilmektedir. $E()$ fonksiyonu Denklem 3.27'da gösterilmektedir. Dönüşüm parametrelerinin kestirimi ise Denklem 3.28'de verilmiştir.

Dönüşüm parametlerini kestirmek için, bir ızgara tarama yaklaşımı kullanılmaktadır. Izgaraya değerler biriktirmek için, verilen $\mathbf{I}$ görüntüsü, $d_x(p), d_y(p) \in [s_{enk}, s_{enb}]$ sapma adetleri ile projektif dönüşüm kullanılarak dönüştürülmektedir ve görüntünün değerleri doğrusal enterpolasyon ile doldurulmaktadır. Bu durumda, örneğin bir tek $p=4$ köşesi için, bu köşe noktası Çizelge 3.1'deki başlangıç değerinden s_{enk}, s_{enb} kadar sapabilmektedir. Örneğin $s_{enk}=-20, s_{enb}=+20$ alındığında, bu köşe için 41×41 büyüklüğünde bir ızgara meydana gelmektedir ve her bir ızgara noktası için dönüştürülmüş görüntü üzerinden bir en yüksek normalize edilmiş çapraz korelasyon değeri üretilmektedir.

Çizelge 4.27'da verilen değerlerde 1024×1024'lük bir görüntü parçası değerlendirilmektedir ve dönüşüm sonrasında elde edilen görüntü parçasındaki olası boş alanlardan kurtulabilmek için bu görüntü parçasının ortasından bir 512×512'lik bir parça alınarak işleme devam edilmektedir. Normalize edilmiş korelasyon değeri ise, bu parçadan elde edilen gürültü ile, 1024×1024 boyutundaki kamera PRNU parmak izi arasında her bir $d_x(p), d_y(p)$ değeri için Denklem 3.28 ile hesaplanmakta ve kaydedilmektedir.

$$E(d_x(p),d_y(p)) = max\ \text{normxcorr}\big(\Omega(\text{L}(\text{T}(\mathbf{I}),d_x(p),d_y(p))),\hat{\mathbf{F}}\big). \tag{3.27}$$

Denklem 3.28'de, T, I görüntüsüne uygulanmış olan parametreleri bilinmeyen dönüşümü ifade etmektedir. L ise bu dönüşümün, anlatılan işlem sonucunda ulaşılmak istenen ters

dönüşümünü ifade eder. F ise gürültü kestirim fonksiyonudur.

Verilen şekilde değerleri oluşturulan ızgarada bulunan en yüksek değere karşılık gelen $d_x(p), d_y(p)$ değeri ile ilgili başlangıç koordinatı değerlerinin toplamı, T'nin ters dönüşüm parametreleridir ve Denklem 3.28'de bu işlem gösterilmektedir.

$$\big(\hat{x}^{'}(p), \hat{y}^{'}(p)\big) \approx \big(x(p), y(p)\big) + \underset{d_x(p), d_y(p)}{argmax} \big(\mathrm{E}(d_x(p), d_y(p))\big). \tag{3.28}$$

Denklem (3.28)'da, toplama işlemi yerine, Denklem 3.29'de gösterildiği gibi çıkartma işlemi yapılırsa, bilinmeyen dönüşüm fonksiyonuna (T) ilişkin parametrelerinin de elde edilmesi mümkün olmaktadır. Benzer şekilde, dönüşüm işleminin kamera PRNU parmak izi parametresi **F** üzerinde uygulanması halinde, görüntünün bilinmeyen dönüşüm parametrelerine doğrudan erişilebilmesi mümkün olacaktır.

$$\hat{x}(p), \hat{y}(p)\big) \approx \big(x(p), y(p)\big) - \underset{d_x(p), d_y(p)}{argmax} \big(\mathrm{E}(d_x(p), d_y(p)) \tag{3.29}$$

Bölüm 4.4 kısmında, bu yönteme ilişkin elde edilen bulgular ve kullanılan veriler açıklanacaktır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, KKT hakkında geliştirdiğimiz yöntemlere ilişkin bulgular sunulacak ve tartışılacaktır. Bulgulara geçilmeden önce, deneylerin yapıldığı veri tabanları ve bu veri tabanlarının kullanımı kısaca tanıtılacaktır.

Bölümler 4.1 ve 4.2 birbirinin devamı niteliğindedir ve tez kapsamında gerçekleştirilen KKT karşıtı çalışmalara ilişkin bulgular sunulacaktır. Hatırlatmak gerekirse, bu konuda önerilen yöntemlerin ilki ÖY-1, ikincisi ise ÖY-2 olarak isimlendirilmektedir. Bu iki bölümde şekillerde ve çizelgelerde rakip yöntemlerden düz yüzey düzeltmesine dayanan yöntem, "DYD", basit gürültü temizleme işlemi, "BGT"; görüntüden PRNU parmak izi çıkartılmasına dayalı Li'lerin yöntemi ise "LiY" kısaltmalarıyla çağrılacaktır. Konuya ilişkin bulgular açıklanırken, her bir veri tabanı ile elde edilen yöntem kümesi ve görüntüler farklı olduğu için iki ayrı bölümde bulgular sunulacaktır.

Bölüm 4.1'de kamuya açık olan bir görüntü veri tabanından elde edilen materyal ile gerçekleştirilen deneylere ilişkin bulgular sunulacaktır. Bu kısımda, DYD, BGT ve ÖY-1 yöntemleri karşılaştırılmaktadır. İkinci ve daha büyük bir görüntü kümesinde gerçekleştirilen kıyaslamanın sonuçları ise Bölüm 4.2'de sunulmaktadır. Burada ise kendi veri tabanımızdaki görüntüler kullanılmaktadır ve LiY, ÖY-1 ve ÖY-2 yöntemlerine ilişkin karşılaştırma sonuçları yer almaktadır.

Bölümler 4.3 ve 4.4'de ise, PRNU tabanlı KKT'nin, kaynakları gizlenmiş görüntülerde nasıl gerçekleştirilebileceğine ilişkin önerilen yöntemlerle elde edilen bulgular açıklanmaktadır. Bölüm 4.3'de, Yama Eşleştirme işlemine dayalı PRNU tabanlı KKT karşıtı yöntemle elde edilen bulgular açıklanır iken, Bölüm 4.4'de, geometrik dönüşümlerle yapısı değişen görüntülerin PRNU tabanlı KKT ile tespitine ilişkin bulgular açıklanmaktadır.

Çizelge 4.1. Görüntü veri tabanı. Cihaz no sütunu ile, bu cihazlarda eşleşen ve eşleşmeyen kameraların veri tabanındaki cihaz numaraları ifade edilmektedir.

Kamera	Model	Doğal Çözünürlük	Cihaz No. (eşleşme)	Diğer Cihaz No. (eşleşmeme durumu)
Sony	DSC-H50	3456×2592	Id 0	Id 1
Nikon	D200	3872×2592	Id 1	Id 0
Panasonic	DMC-FZ50	3648×2736	Id 0	Id 2

4.1 Uyarlamalı PRNU temizleme yöntemi, Düz Yüzey Düzeltme ve Basit Gürültü Temizleme yöntemlerinin PRNU tabanlı KKT karşısındaki başarımı

Bu bölümde, önerilen ilk yöntem (ÖY-1) ve düz yüzey düzeltme yöntemlerinin PRNU tabanlı KKT karşısındaki başarımına ilişkin bulgular verilecektir. Bu bölümde, şekillerde ve çizelgelerde rakip yöntemlerden düz yüzey düzeltmesine dayanan yöntem, "DYD", basit gürültü temizleme işlemi, "BGT" ile çağırılacaktır.

Bu kısımda bulgular açıklanırken, her bir veri tabanı ile elde edilen yöntem kümesi ve görüntüler farklı olduğu için iki ayrı kıyaslama yapılacaktır. Birinci kıyaslama kamuya açık olan Dresden Image Database (DID) olarak isimlendirilen veri tabanından elde edilen materyal ile gerçekleştirilmektedir. Bu kıyaslamada DYD, BGT ve ÖY-1 yöntemleri karşılaştırılmaktadır. İkinci ve daha büyük bir görüntü kümesinde gerçekleştirilen kıyaslamada ise kendi veri tabanımızdaki görüntüler kullanılmaktadır. Bu kıyasta LiY, ÖY-1 ve ÖY-2 yer almaktadır. Çizelge ve şekil metinlerinde kıyasın hangisi olduğu ayırt edici olması için parantez içerisinde belirtilecektir.

DID veritabanından Çizelge 4.1'da belirtilen üç kamera kullanılmıştır. Çizelgede yer alan cihazlarla çekimi yapılan doğal sahne görüntüleri, karanlık ve aydınlık görüntüler ile birlikte indirilmiştir. İşlemlerin bilgisayar yükünün azaltılması için görüntüler herhangi bir yeniden kodlamaya tabi tutulmadan 1024×1024 piksel genişliğinde orta bölgelerinden kırpılmıştır. Elde edilen görüntüler üzerinde ÖY-1 yöntemi uygulanmıştır. Kameraların PRNU parmak izleri bu amaçla ayırılan 50 adet görüntüden kestirilmiştir. Geriye kalan görüntülerden de 50 adeti bu kısımda karşılaştırılan yöntemlerin başarımlarının ölçümünde kullanılacaktır.

4.1.1 Görüntü Veritabanları ve Yöntem Başarımları

Çizelge 4.1'deki her bir cihaz için, ilgili cihaz altında listelenen doğal sahne görüntülerinden ayırılan 50 adeti ile PRNU parmak izleri elde edilmiştir. Bunun için görüntülerin üç renk kanalından elde edilen dalgacık gürültüleri gri dönüşümü katsayıları kullanılarak tek kanala indirgenmiştir. Daha sonrasında Denklem 2.2'de verilen işlem kullanılarak kamera PRNU parmak izleri elde edilmiştir. Eşleşmeyen durum için ise, aynı modelde farklı numaralı bir cihaz kullanılmaktadır. Bu cihazlar için de birer PRNU parmak izi, yine 50 adet görüntü ile aynı şekilde elde edilmektedir.

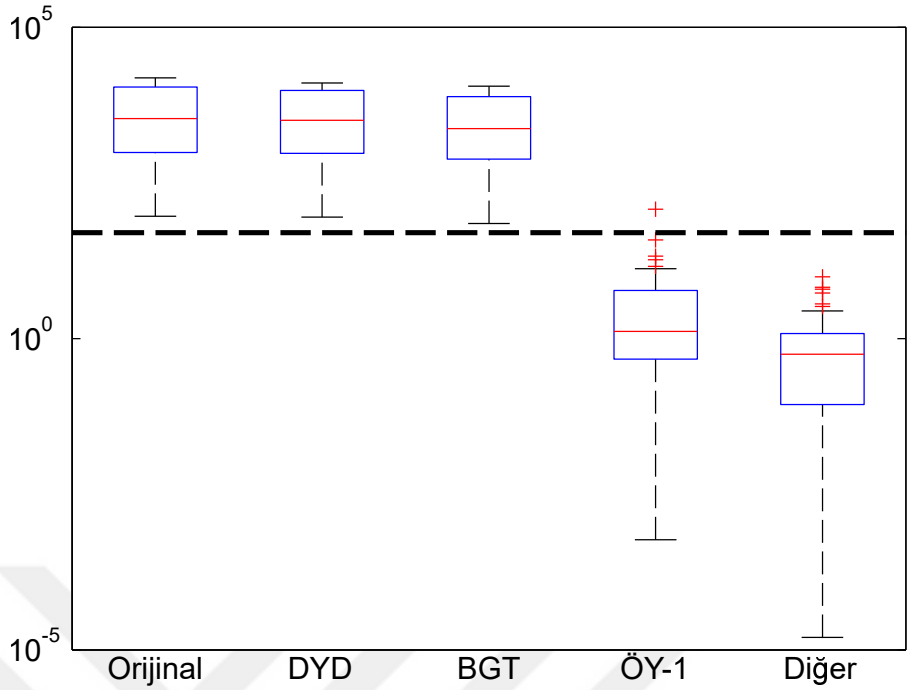
düz yüzey düzeltmesi uygulamak için ise, her bir cihaz için, 25 karanlık ve 25 aydınlık çerçeve Denklem 3.15, 3.16 ve 3.17'de gösterilen işlemlerle uygulanmıştır. Bu sayede test görüntülerinin DYD uygulanmış halleri elde edilmiştir.

İlave olarak, test görüntülerinin basit gürültü temizleme uygulaması işlenen halleri de elde edilmiştir. Bu uygulama, ÖY-1'in görüntü oluşturma ifadesinin yer aldığı Denklem 3.11'de, $\beta_a = 1$ şekilde tek bir değer aldığı durumda, yani ilgili β katsayısınında herhangi bir arama işlemi yapılmadan üretilen görüntüleri ifade etmektedir.

ÖY-1'in uygulamasında, β_a katsayısı için Şekil 3.2'de verilen akış diyagramı kullanılmaktadır. Buradaki başarım sağlayan katsayı, Denklem 3.10'daki şartı sağlayan katsayıdır.

Bu kısımda karşılaştırılan üç yöntemin kıyaslanması için, test görüntülerinin her birinin bahsi geçen yöntemlerle işlenmiş versiyonları oluşturulmuştur. Bunlar, (i) DYD ile işlenmiş versiyonu, (ii) BGT ile işlenmiş versiyonu ve (iii) ÖY-1 ile, yani önerilen uyarlamalı PRNU temizleme yöntemi ile işlenmiş versiyonu. İşlenen her bir görüntü, %100 kalite ayarı ile JPEG formatında kaydedilmiştir. Yöntem başarımına ilişkin ölçütler, yalnızca bu işlenmiş görüntüler ile elde edilecektir ve PCE cinsinden sunulacaktır.

Önerilen yöntem (ÖY-1) ile görüntüler işlenirken, daha önce bahsi edilen 50 adet görüntü ile elde edilen kamera PRNU parmak izi kullanılmaktadır. Dolayısı ile yöntemi uygulayan anonimleştirici, bu parmak izine sahiptir ve diğer yöntemler ise PRNU par-

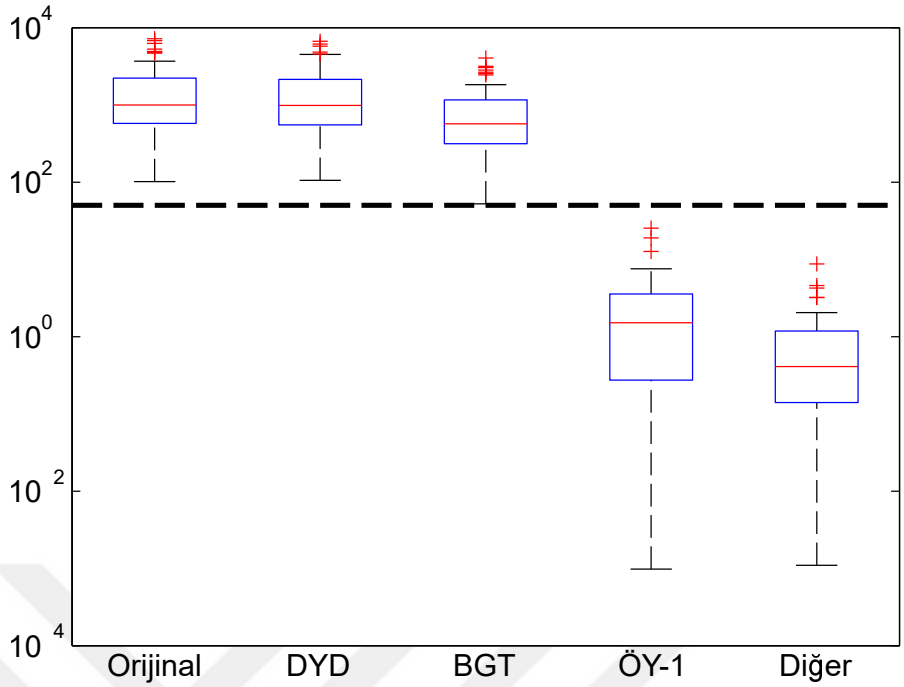


Şekil 4.1. Sony H50 ile elde edilen görüntülerde karşılaştırılan yöntemlerin başarımı. Önerilen yöntem Sony H50 ile çekilmiş görüntülerin %98'ini anonimleştirmiştir. Dikey eksen logaritmik PCE değerlerini ifade etmektedir. (Karar eşiği PCE değeri 50 alınmaktadır ve bu değer kesikli, kalın siyah çizgi ile ifade edilmektedir.)

Çizelge 4.2. Karşılaştırılan yöntemlerin ortalama PRNU benzerlikleri (Karar eşiği PCE değeri = **50**)

	Orijinal	DYD	BGT	ÖY-1	Diğer Kamera
Sony	**5621.94**	4843.05	3938.12	**6.29**	0.33
Nikon	**1852.25**	1747.09	1007.26	**2.88**	0.33
Panasonic	**978.33**	966.02	641.81	**22.50**	0.66
Ortalama	**2880.90**	2572.30	1904.50	**10.14**	0.43

mak izi bilgisi olmadan çalışmaktadır. Oysa ki, anonimleştirici ile analizcinin aynı parmak izine sahip olması çok zayıf bir ihtimaldir. Bu nedenle, bulgular elde edilirken, bu kameralardan elde edilen 50 yeni görüntüden elde edilen bir kamera PRNU parmak izi kullanılacaktır. Böylece, ÖY-1 ile görüntüler işlenirken erişilen PRNU parmak izi haricinde, yine bu kameralarla çekilen farklı görüntüler ile elde edilen yeni birer PRNU parmak izinin kullanılması ve daha gerçekçi bir analiz yapılması mümkün olmaktadır. Bu kısımda yayınlanan tüm bulgularda sunulacak benzerlik değerleri bu yeni PRNU parmak izi kullanılarak ölçülmektedir.

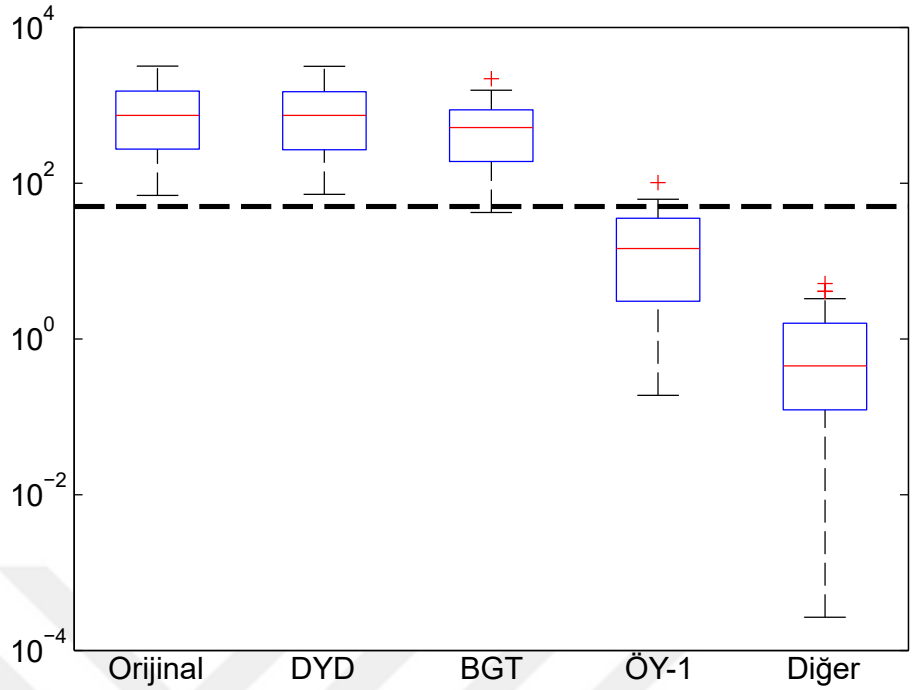


Şekil 4.2. Nikon D200 ile elde edilen görüntülerde karşılaştırılan yöntemlerin başarımı. Önerilen yöntem Nikon D200 ile çekilmiş görüntülerin tamamını anonimleştirmiştir. Dikey eksen logaritmik PCE değerlerini ifade etmektedir. (Karar eşiği PCE değeri 50 alınmaktadır ve bu değer kesikli, kalın siyah çizgi ile ifade edilmektedir.)

Çizelge 4.3. Anonimleştirme Oranları

	DYD	BGT	ÖY-1
Sony	%0	%0	**%98**
Nikon	%0	%0	**%100**
Panasonic	%0	%2.2	**%84.4**
Ortalama	%0	%0.68	**%94.4**

Ölçülen PCE değerleri Şekiller 4.1, 4.2, ve 4.3'de sıra ile Sony, Nikon ve Panasonic kameraları için gösterilmektedir. Eşleşen kameraya ilişkin (Çizelge 4.1) işlenmemiş görüntülerle elde edilen ölçümler de bu kutu çizimlerinde en solda kıyas amaçlı olarak yer almaktadır. Kutu çizimlerindeki kesikli çizgiler PRNU tabanlı KKT için karar eşiğini göstermektedir, ki bu değer PCE cinsinden 50 olarak alınmıştır ve bu bilgi karşılıklığa mahal vermemek adına şekillerin alt metinlerde ifade edilmektedir. Kutu çizimlerinde kutuların içerisinde renkli bir şekilde yer alan düz çizgiler ilgili PCE değer dağılımının medyanını, kutuların üst sınırı 75. yüzdeliği, alt sınırı ise 25. yüzdelik değerini ifade etmektedir. Dağılıma aykırı değerler ise, artı işareti ile kutu çizimlerinde



Şekil 4.3. Panasonic FZ50 ile elde edilen görüntülerde karşılaştırılan yöntemlerin başarımı. Önerilen yöntem Panasonic FZ50 ile çekilmiş görüntülerin %84 kadarını anonimleştirmiştir. Dikey eksen logaritmik PCE değerlerini ifade etmektedir. (Karar eşiği PCE değeri 50 alınmaktadır ve bu değer kesikli, kalın siyah çizgi ile ifade edilmektedir.)

gösterilmiştir. Eşleşmeyen kamera ile elde edilen PRNU benzerliğinin dağılımı ise ise, kutu çizimlerinde en sağda yer almaktadır. Bu çizimlerdeki değerler aynı zamanda Çizelge 4.2'de yer almaktadır. Ayrıca bu ölçümlere ilişkin korelasyon değerleri de Çizelge 4.4'de verilmektedir.

Şekiller 4.1-4.3 ve Çizelge 4.2'de gösterilen bulgular, ÖY-1'in hem düz yüzeyleştirme düzeltmesinden, hem de basit gürültü temizlemeden üstünlüğünü göstermektedir. Dahası, Çizelge 4.3'deki başarı oranlarından karşıt yöntemlerin deneyde kullanılan JPEG görüntülerinde PRNU karşıtı olarak kullanımının mümkün olmadığı görülmektedir. ÖY-1 ile elde edilen başarım oranı %94 civarındadır. Bu oran DYD ve BGT için %0 mertebesindedir. Burada basit gürültü temizlemenin, ÖY-1 ile aynı gürültü temizleme filtresini kullanmasına rağmen başarım sağlayamadığı görülmektedir.

Karşılaştırılan yöntemlerin görüntü kalitesine nasıl etki ettiği de PRNU tabanlı KKT karşıtı uygulamalar açısından oldukça önemlidir. Zira, arka arkaya görüntü kalitesini

Çizelge 4.4. Karşılaştırılan Yöntemlerin Ortalama Korelasyon Katsayı Değerleri (F-50 için, Karar Eşiği=**0.0100**)

	Orijinal	DYD	BGT	ÖY-1	Diğer Kamera
Sony	**0.0717**	0.0652	0.0596	**0.0016**	0.0009
Nikon	**0.0407**	0.0395	0.0298	**0.0013**	0.0008
Panasonic	**0.0300**	0.0298	0.0242	**0.0039**	0.0008
Ortalama	**0.0481**	0.0454	0.0383	**0.0022**	0.0008

bozucu işlemlerin yapılması halinde PRNU gürültüsünün de zayıflayacağı bilinmektedir. Buna karşın, anlaşılırlığı kaybolan bir görüntünün kaynağının gizli olup olmadığı da önemini yitirecektir. Dolayısı ile gerçekleştirilecek PRNU tabanlı KKT karşıtı uygulamaların görüntü kalitesine bozucu etkisinin düşük olması gerekmektedir.

Çizelge 4.5. Karşılaştırılan yöntemlerle anonimleştirilen görüntülerin kalitesi (PSNR [dB]). Ort. sütununda ortalama değerler, Sap. sütunu ile standart sapma miktarları ifade edilmektedir.

	DYD		BGT		ÖY-1	
	Ort.	Sap.	Ort.	Sap.	Ort.	Sap.
Sony	49.76	0.51	44.24	4.15	**36.93**	**3.17**
Nikon	53.79	2.08	48.42	3.40	**41.68**	**3.22**
Panasonic	51.47	1.61	44.51	3.32	**36.68**	**3.01**
Ortalama	47.88	1.39	45.76	3.63	**38.39**	**3.13**

Bu nedenle yöntemlerin karşılaştırılmasında, her bir yöntemin görüntülerde orijinallerine (temiz) göre ne kadar kalite kaybına sebep olduğu da PSNR cinsinden ölçülmüştür ve elde edilen bulgular Çizelge 4.5'de verilmektedir. ÖY-1 ile işlenmiş görüntülerin ortalama 38 dB PSNR'a sahip olduğu ve 3.1 dB sapmaya sahip olduğu görülmektedir. Bu değerler rakip yöntemlere göre görüntü kalitesinde daha fazla kayıp oluştuğunu işaret etmektedir.

4.1.2 Bulguların Değerlendirilmesi

ÖY-1 ile işlenmiş görüntülerle elde edilen bütün PCE ölçümleri PRNU tabanlı KKT yönteminin karar eşiğinin altında kalmıştır. ÖY-1 ile işlenen eşleşen kamera ile çekilmiş görüntülerin PCE ölçümleri ile eşleşmeyen kameralardan gelen görüntülerin PCE ölçümleri birbirine oldukça yakındır. Dahası, Panasonic kamerası haricinde ÖY-1 ile

işlenen görüntülerin neredeyse tamamının PCE ölçümü, eşleşmeyen kameradan gelen görüntülerle üretilebilen en yüksek PCE değerinin de altında değer üretmektedir. Elde edilen bulgular, PRNU tabanlı KKT incelemesi yalnızca ölçüt büyüklüğüne göre karar eşiği kullanılmadan yapılır ise, ÖY-1 ile işlenen eşlenen cihaz görüntülerinin değil de, eşleşmeyen cihaz ile çekilen görüntülerin kaynağı sorgulanan kameradan gelmiş olarak tanımasına sebep olabileceğini göstermektedir. Kısaca PRNU tabanlı KKT yanıltılmış olacaktır. Buna karşın, ÖY-1 ile işlenmiş görüntülerin bu derece düşük PCE değeri üretmesinin her zaman istenilir olmayabileceği değerlendirilmektedir. Daha formel olarak ifade etmek gerekirse, eşleşen "x" kamerası ile çekilen bir *i*ci I_x görüntüsü ile, eşleşmeyen "y" kamerası ile çekilen bir *i*ci I_y görüntüsü arasında, $\mathrm{PCE}(I_x^a(i), F_x) << \min(\mathrm{PCE}(I_y, F_x))$ şeklinde ortaya çıkan yüksek başarılı durum, analizciye önerilen yöntemin uygulanmış olduğuna ilişkin bir ipucu sunabilir. Bu gibi risklerden kaçınmak için, ÖY-1 uygulanırken başarı eşiği ε_a, $\min(\mathrm{PCE}(I_y, F_x)) < \varepsilon_a < \max(\mathrm{PCE}(I_y, F_x))$ aralığı dahilinde seçilebilir. Bu ifadelerde anılan $\mathrm{PCE}(I_y, F_x)$ ifadesi ile, eşleşmeyen "y" kamerası ile çekilen tüm görüntülerin eşleşen "x" kamerasının PRNU parmak izi ile arasındaki PCE cinsi benzerlik kastedilmektedir, ki bu değerlerin dağılımı Şekiller 4.1-4.3'deki en sağda yer alan kutularda gösterilmektedir.

Çizelge 4.3'de önerilen yöntem'in (ÖY-1) hem düz yüzey düzeltmesi (DYD) hem de basit gürültü düzeltme (BGT)'den daha iyi başarım gösterdiği görülmektedir. Sonuç olarak önerilen yöntemin PRNU tabanlı KKT karşısında başarılı olduğu görülmektedir. Anonimleştirilen görüntülerin kalitesi Çizelge 4.5'de verilmektedir. ÖY-1 ile işlenen görüntülerin kalitesi ortalama 37dB civarındadır. Görüntülerin kalitesi ile erişilen kaynak gizleme başarımı arasında bir ödünleşme olduğu varsayılırsa, görüntü kalitesi açısından da ÖY-1 dahilinde bir sınırlandırma eklenebileceği de değerlendirilmektedir.

ÖY-1 ile işlenen görüntülerle tekrar KKT yapılabilmesi için izlenebilecek yollardan bir tanesi, kamera PRNU parmak izinin kalitesini arttırmak olacaktır. Bunu yapmak için basit bir şekilde parmak izi eldesinde kullanılan görüntülerin sayısı arttırılabilir. Böyle bir durumda dahi, KKT uygulayıcılarının işlem maliyetlerinin artacağını değerlendirmekteyiz, ki bu durumda görüntülerin kaynağının rutin bir şekilde takibi mümkün olmay-

acaktır. Buna karşın bir sonraki bölümde böyle bir saldırı karşısında önerilen yöntem ile işlenen görüntülerin kaynak gizleme kapasitesinin ne kadar gürbüz olduğuna ilişkin bulgular bir sonraki bölümde açıklanacaktır.

Bilgimiz dahilinde, tezde açıklanan yöntem haricinde kararlı bir PRNU benzerliği ölçütü olan tepe-ilinti enerjisi oranı'nı (PCE) hedefleyen başka bir PRNU tabanlı KKT karşıtı yöntem bulunmamaktadır. Deneylerde elde edilen bulgular, bütün görüntülerin PRNU benzerliğinin kaynak tanıma karar eşiğinin altına düşürülebildiğini ve bu esnada görüntü kalitesinin ve anlaşılırlığının da korunduğunu ortaya koymaktadır.

Gerçekleştirilen teorik ve deneysel analiz ile, marka ve modelden bağımsız olarak görüntülerin kaynaklarının PRNU ile tespit edilebilmesinin önüne geçilebileceği gösterilmiştir. Önerilen yöntem ile kameraya fiziki bir erişim yapılması gerekmemektedir. Bunun yerine, ilgili kamera ile çekildiği bilinen görüntülerin kullanılması yeterlidir. Bu görüntülerle ilgili kameraya ilişkin bir PRNU parmak izi elde edilmekte ve bu PRNU parmak izi kullanılarak önerilen yöntem uygulanmaktadır. Bu PRNU parmak izi ile, kaynağı gizlenecek görüntüden elde edilen PRNU gürültü kestirimi arasındaki benzerlik ölçülmekte, ve bu ölçü PRNU tabanlı KKT'nin karar eşiğinin altına düşürülmektedir. Bu benzerlik azaltıcı işlem esnasında görüntüden ilgili doğrudan kameranın PRNU parmak izini çıkartmak gibi bir işlem gerçekleştirilmemektedir. Bu yaklaşım sayesinde, önerilen yöntem ile işlenen görüntülerin PRNU parmak izi kalitesinin arttırılmasına dayalı olası saldırılar ile kaynaklarının açık edilmesinin mümkün olmadığını değerlendirmekteyiz ki bu kısımda açıklanan bulguların devamı niteliğindeki Bölüm 4.2'de yöntemin saldırılar karşı gürbüzlüğüne ilişkin bulgular verilecektir.

Bu kısımda karşılaştırılan rakip yöntemler DYD ve BGT'dir. BGT ÖY-1 ile aynı gürültü temizleme yöntemini kullanmakta olduğu için kontrol amaçlı olarak deneylere dahil edilmiştir. DYD ise literatürde uzun süredir bilinmekte olan ve örüntü gürültüsünü zayıflattığı bilinen bir yöntem olmasına karşın, uygulaması özel görüntüleme cihazları ile çekilen görüntülerde mümkündür ve bu durumda dahi titiz bir çalışma ve disiplin gerektirmektedir. DYD yönteminin bu nedenle tüketiciler tarafından kullanılan kameralarla elde edilen görüntülerde PRNU tabanlı KKT'yi engelleme amacına uygun olmadığını

değerlendirmekteyiz.

Önerilen yöntemin yasadışı bir şekilde görüntü kaynaklarının takibini engellemekte uygulanabilir bir yöntem olduğunu değerlendirmekteyiz. Ayrıca, açıklanan yöntemin ve bulguların konunun araştırmacılarına hem daha iyi KKT yöntemlerinin, hem de daha iyi KKT-karşıtı yöntemlerinin geliştirilmesinde yol açıcı olacağını değerlendirmekteyiz.

4.2 Uyarlamalı PRNU temizleme yöntemi ve PRNU çıkartma yönteminin PRNU tabanlı KKT karşısındaki başarımı

Bu bölümde, bulguları Bölüm 4.1'de sunulan ÖY-1 yöntemi ile, diğer önerilen yöntem, ÖY-2 ve Li'lerin yöntemine (LiY) ilişkin geniş bir görüntü veritabanında elde edilen bulgular detaylı bir şekilde verilmektedir. Bulgularda, farklı JPEG sıkıştırma seviyelerine sıkıştırılmış görüntülerin önerilen yöntemlerle nasıl bir kaynak gizleme başarımına ulaşılabildiği ve yine önerilen yöntemlerle kaynakları gizlenmiş görüntülerde daha fazla bilgiye erişimi olan bir hasım tarafından KKT yapılma imkanına ilişkin bulgular da sunulmaktadır.

4.2.1 Görüntü Veritabanları

Geliştirilen anonimleştirme yöntemlerinin Li'lerin yöntemine karşı başarımının denenmesi için, 13E092 numaralı ve "Sayısal İmgelerin Kamera Tanıma Yöntemlerine Karşı Anonimleştirilmesi" isimli TÜBİTAK projesi kapsamında elde edilen 5 adet kamera kullanılmıştır. Bu kameralardan 3 tanesi "compact" tabir edilen ve sabit yazılımlı kameralar iken, 2 tanesi ise cep telefonlarıdır. Bu veri tabanı için veriler toplanırken Uludağ Üniversitesi kampüsünde yer alan yürüyüş yolları ve çeşitli ağaçlı bölgeler kullanılmıştır. Benzer şekilde, Bursa'nın Nilüfer ilçesinde de çeşitli ortam çekimleri yapılmıştır. Çekimler esnasında kişilerin yüzlerinin dahil edilmediği sahnelerin çekilmesine hassasiyet gösterilmiştir. veri tabanında yer alan cihazların detaylı marka model bilgileri ve materyalin miktarı ve görüntü çözünürlükleri Çizelge 4.6'de verilmektedir.

Bahsi geçen cihazlarla gerçekleştirilen çekimlerde mümkün olduğunca değişik sahneler görüntülenmiştir ve kameranın sensörünün sunduğu en yüksek çözünürlük ve görüntü

Çizelge 4.6. Deneylerde kullanılan görüntü veri tabanına ilişkin kamera modelleri ve görüntü sayıları bilgileri. Marka sutununda yer alan ifadeler sonuçlar kısmında etiket olarak kullanılacaktır.

Marka	Model	Doğal Çözünürlük	Görüntü Adeti
BenQ	AE100	4320×3240	217
Casio	QV-R200	4320×3240	265
LG	Nexus 4	3264×2448	204
Olympus	D-745	4288×3216	207
Samsung	S3 Mini	2560×1920	238

kalitesi ayarı tercih edilmiştir. Cihazların farklı çözünürlüklerde görüntü üretmelerinden dolayı görüntülerin ortalarında yer alan 1024×1024'lük bölge kırpılmıştır.

Önerilen yöntemle anonimleştirme yapılabilmesi için kameralardan öncelikle kamera PRNU parmak izlerinin elde edilmesi lazım gelmektedir. Bunun için, her kamera için Çizelge 4.6'de gösterilen adetteki görüntüden 150'şer tanesi çeşitli kalitede PRNU parmak izi kestirimi için rasgele seçilerek ayırılmıştır, geriye kalan görüntüler (test görüntüleri) anonimleştirme deneylerinde kullanılmaktadır.

4.2.2 Başarım

Anonimleştirilen görüntülerin PCE cinsinde anonimleştirilme değerinin belirlenmesinde bu parmak izleri kullanılacaktır. Hatırlatmak gerekirse anonimleştirme değerleri önerilen yöntemle kıyaslanacak Li'nin yöntemi için bu fonksiyon Denklem 3.18'da, önerilen yöntemler için bu fonksiyonlar sıra ile Denklem 3.9 ve Denklem 3.13'de verilmişti. Anonimleştirmede kullanılan kamera PRNU parmak izi $\hat{\mathbf{F}}$, başlangıç parmak izi olarak adlandırılır ve $\mathbf{F_{init}}$ ile simgelenir. Bu başlangıç parmak izinin kestirimi, PRNU kestirimi için ayrılmış olan 150 imgeden yine rasgele seçilen 50 tanesiyle gerçekleştirilmektedir. Sonrasında, başlangıç parmak izi $\mathbf{F_{init}}$ ve test görüntüleri tezde geçen anonimleştirme yöntemlerine girdi olarak verilmiş ve test görüntülerinin anonimleştirilmiş halleri elde edilmiştir. Test görüntülerinin asılları ile, anonimleştirilmiş hallerinin kamera PRNU parmak izi ile benzerliği karşılaştırılarak PCE cinsinden ölçülmektedir ve ölçüm sonuçları Çizelge 4.7'de verilmektedir.

Hatırlanacağı üzere, KKT için karar eşiği değeri τ, PCE cinsinde 50 değeri olarak kabul

Çizelge 4.7. Yöntemlerle işlenen görüntülerin PRNU benzerlikleri (PCE cinsinde). Karar eşiği PCE değeri $\tau = 50$.

Kameralar	Orijinal	LiY	ÖY-1	ÖY-2
BenQ	469,87	0,000004	3,090783	5,573458
Casio	610,68	0,000007	0,555102	1,262743
Nexus	3213,55	0,000001	0,468614	0,641375
Olympus	1532,49	0,000003	0,129593	0,000540
Samsung	3182,43	0,000003	1,984326	0,000992
Ortalama	1801,81	0,000004	1,245684	1,495822

Çizelge 4.8. Karşılaştırılan üç yöntem için ortalama β ve döngü sayısı değerleri.

	LiY		ÖY-1		ÖY-2	
Kameralar	β	Döngü	β	Döngü	β	Döngü
BenQ	0,914	41,609	1,783	40,290	2,185	37,797
Casio	0,817	41,835	1,992	40,851	1,308	37,207
Nexus	0,646	40,609	1,339	40,536	3,378	37,971
Olympus	0,860	41,537	1,673	39,981	1,531	37,222
Samsung	0,664	41,287	1,513	44,500	1,239	38,340
Ortalama	0,780	41,375	1,660	41,232	1,928	37,707

edilmektedir. Çizelge 4.7'de yer alan sonuçlara göre, tezde geçen anonimleştirme yöntemlerinin KKT karşısında başarılı olduğu görülmektedir, zira karşılaştırılan her bir yöntemle üretilen görüntülerin PCE değerleri, karar eşiğinin altında kalmaktadır.

Çizelge 4.8'de, yöntemler ile elde edilen β değerleri ve anonimleştirmenin sonlandırıldığı döngü adetlerinin ortalama değerleri verilmektedir. Çizelgede yer alan sonuçlara göre, Li'lerin yöntemi ile önerilen yöntemlere kıyasla kaydadeğer düşüklükte β değerleri görülürken, ÖY-2 %10 daha düşük sayıda döngü ile sonuca ulaştığı görülmektedir.

4.2.3 Anonimleştirilen Görüntülerin Kalite Bakımından Karşılaştırılması

Anonimleştirilmiş görüntülerin kalitesinin değerlendirilmesinde, görüntülerin yapısal benzerliğini ölçmekte kullanılan SSIM isimli (ing. structrual similarity index) ölçüt, PSNR ölçütüne ek olarak kullanılmıştır.

SSIM, görüntünün aydınlığını, karşıtlığını ve köşe yapısını karşılaştırarak -1 ile +1 arasında bir kalite değeri üretmektedir. Görüntü kıyaslanan görüntü arasındaki fark azaldıkça, SSIM değeri artmaktadır, 1 değeri aldığında ise kalitesi karşılaştırılan iki gö-

Çizelge 4.9. Karşılaştırılan yöntemlerle elde edilen görüntülerin kalitesi (PSNR cinsinden [dB]).

Kameralar	LiY	ÖY-1	ÖY-2
BenQ	50,91	38,96	42,08
Casio	51,63	38,58	42,58
Nexus	47,86	29,70	35,03
Olympus	50,15	31,89	39,87
Samsung	51,90	38,46	41,19
Ortalama	50,49	35,52	39,03

rüntü arasında neredeyse bir fark bulunmadığı söylenir (Wang ve diğerleri, 2004).

Çizelge 4.9'de PSNR ve Çizelge 4.10'de SSIM ölçütleri ile yapılan görüntü analizlerinin sonuçları yer almaktadır. Bu değerler, görüntülerin asıllarına kıyasla, anonimleştirilmiş olanların görüntü kalitesini göstermektedir.

Çizelge 4.10. Karşılaştırılan yöntemlerle elde edilen görüntülerin kalitesi (SSIM cinsinde).

Kameralar	LiY	ÖY-1	ÖY-2
BenQ	0,9997	0,9963	0,9822
Casio	0,9997	0,9969	0,9953
Nexus	0,9992	0,9908	0,9968
Olympus	0,9999	0,9919	0,9993
Samsung	0,9997	0,9956	0,9964
Ortalama	0,9996	0,9943	0,9940

Görüntü kalitesi bakımından, ÖY-2'nin, ÖY-1'den üstün olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır. Lakin, önerilen yöntemler, Li'lerin Yöntemine (LiY) göre kaydadeğer oranda (10 dB) düşük kalitede görüntü üretmektedir. ÖY-2 ise, ÖY-1'e göre ortalamada 4dB daha yüksek kalitede görüntü üretmektedir. Karşılaştırma kapsamındaki bütün yöntemler, SSIM açısından birbirine çok yakın ve başarılı sonuç üretmektedir. Bu nedenle oluşan görüntülerin arasında anlaşılırlık bakımından kaydadeğer bir farklılık bulunmadığı söylenebilir.

4.2.4 Karşılaştırılan yöntemlerin KKT saldırıları karşısındaki gürbüzlüğü

Yapılan bu değerlendirmenin gerçekçilik açısından önemli zayıflıkları mevcuttur. Zira, tek bir kamera PRNU parmak izi ile yapılmış olan bu değerlendirmede, analizcinin veya

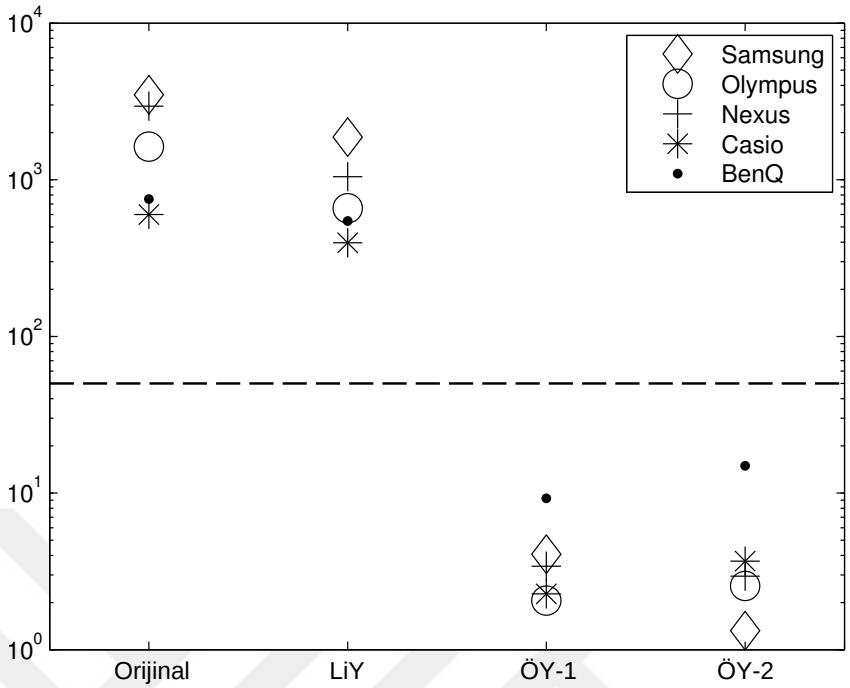
hasmın başka bir orijinal görüntüye erişiminin olmadığı durum dikkate alınmaktadır, halbuki $\mathbf{F_{init}}$'den daha iyi bir kaynak kamera PRNU parmak izine erişim sağlamaları mümkündür. Dolayısı ile daha gerçekçi bir değerlendirme yapılması lazım gelmektedir. Bunu sağlamak adına, bu görüntülerin aynı kameradan elde edilen alternatif kamera PRNU parmak izleriyle de karşılaştırmaları yapılıp sonuçları bu bölümde incelenecektir.

Anonimleştirme yöntemlerinin PRNU tabanlı KKT karşısındaki gürbüzlüklerini değerlendirmek üzere, Bölüm 4.2.2'de $\mathbf{F_{init}}$'in kestirimi için kullanılan 50 görüntü haricinde, PRNU kestirimi için ayrılan 100 görüntü daha elimizde bulunmaktadır. Bu bölümde, saldırı senaryosu gereği, şu durumlara ilişkin bulgular elde edilecektir:

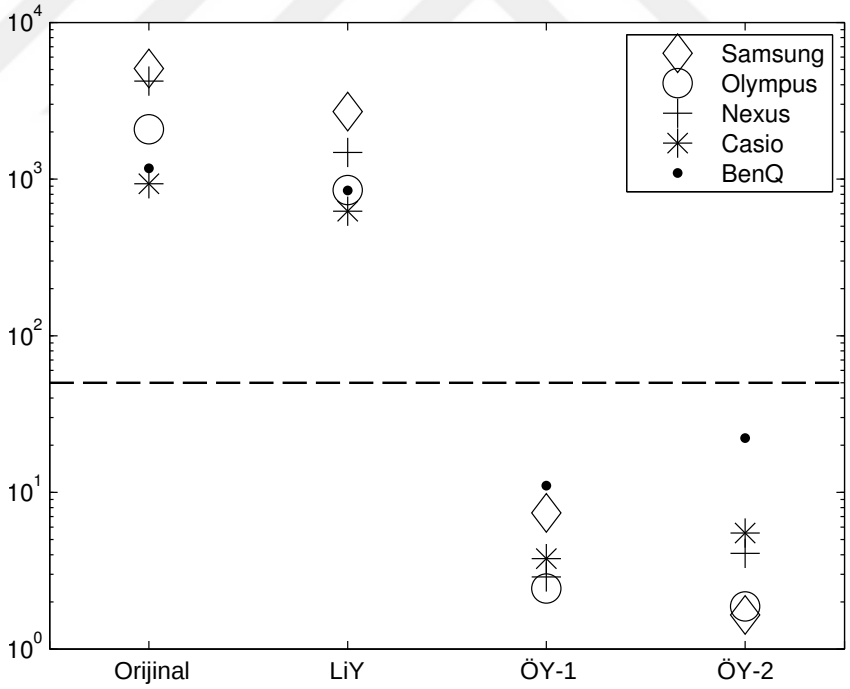
- Hasım, anonimleştirenden daha farklı ama aynı miktarda görüntüye sahip olursa; KKT gerçekleştirebilir mi?
- Hasım, anonimleştirenden daha fazla sayıda ve farklı görüntüye sahip olursa; KKT gerçekleştirebilir mi?

Bu sorulara yanıt verebilmek için, elde kalan 100 ayrı görüntüden, iki adet parmak izi kestirilmiştir ve bu PRNU parmak izlerine, sırayla, F-50 ve F-100. Bu iki semboldeki rakamlar, PRNU parmak izlerinin eldesinde kullanılan imge adetini ifade etmektedir. F-50 için görüntü seçimi rasgele yapılmakta iken, F-100 için ise, kalan bütün görüntüler kullanılmıştır. Her bir kamera için, bu iki kaynak kamera PRNU parmak izi ile bir önceki bölümdeki deneyler, görüntülerin asılları; Li'lerin yöntemi ile anonimleştirilmiş olanları, ÖY-1 ve ÖY-2 ile anonimleştirilmiş olanları için ayrı ayrı incelenmektedir.

F-50 ve F-100 parmak izlerine erişimi olan bir hasım tarafından, tezin bu kısmında incelenen anonimleştirme yöntemlerinin bu saldırı karşısındaki durumu incelenmektedir. Her bir yöntem ile elde edilen anonimleştirilmiş görüntülerin, kullanılan kaynak kamera PRNU parmak izi ile olan PCE cinsi benzerliklerini ortalama PCE değerleri cinsinde gösterilmektedir. Şekil 4.4'de, bu sonuçlar 5 farklı kamera için verilmektedir. Bu değerler aynı zamanda Çizelge 4.11'de verilmektedir. Şekil 4.5 ve 4.6'de kutu çizimleri ile de, Nexus ve Olympus isimli kameralar için bu benzerlik değerlerinin dağılımları gösterilmektedir.

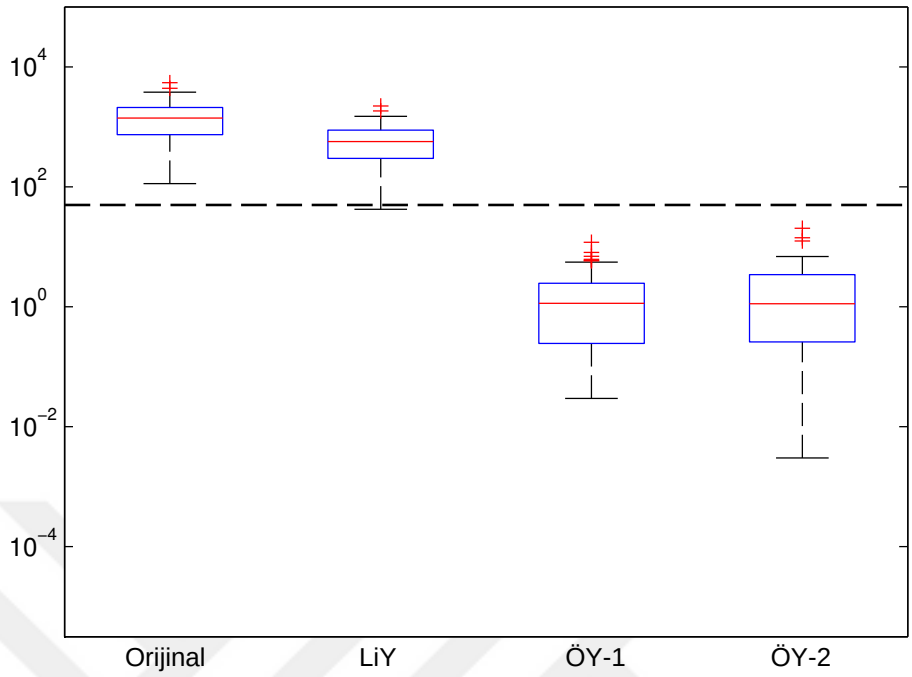


(a) PRNU parmak izi F-50

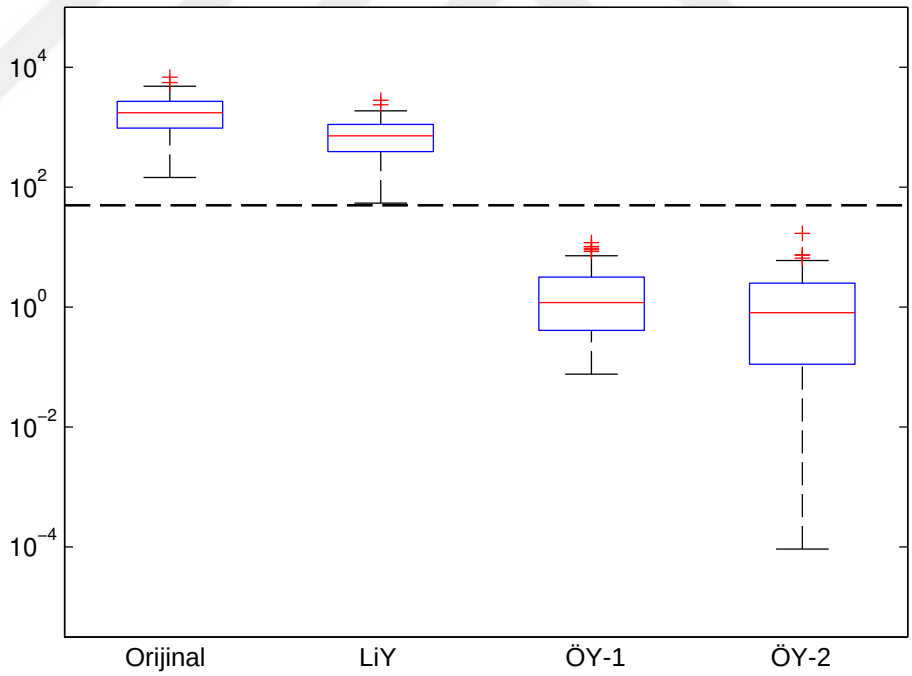


(b) PRNU parmak izi F-100

Şekil 4.4. Anonimliğe saldırı: F-50 ve F-100 isimli analizci PRNU parmak izleri kullanılarak, yöntemlerle elde edilen anonimleşmiş görüntülere saldırıldığında ölçülen ortalama PRNU benzerliği (PCE) (F-50 ve F-100 yalnızca analizcinin elde ettiği parmak izleridir).

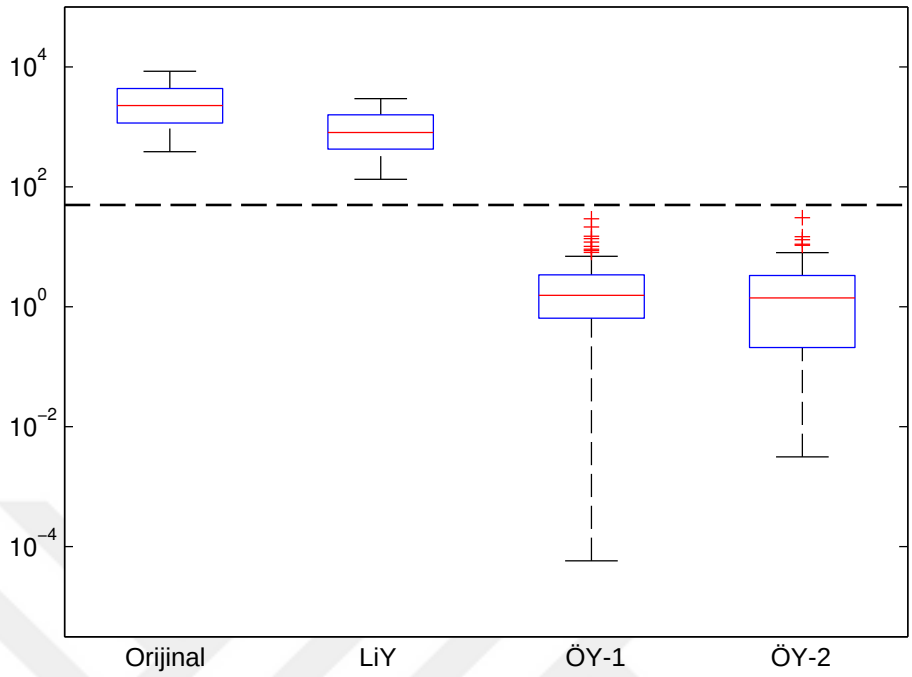


(a) PRNU parmak izi F-50

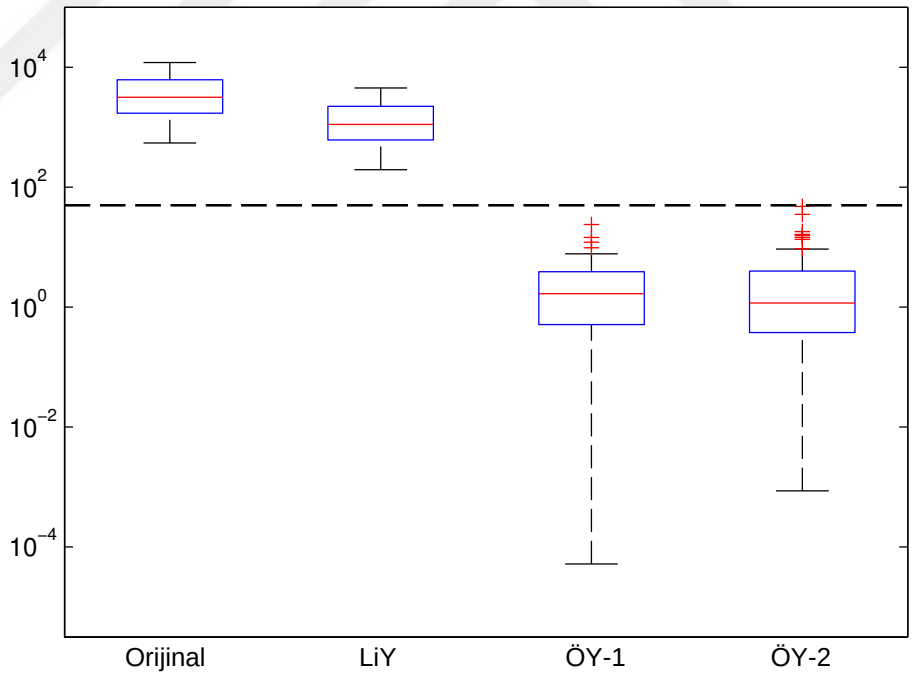


(b) PRNU parmak izi F-100

Şekil 4.5. Anonimliğe saldırı: Olympus ile elde edilen F-50 ve F-100 isimli nitelikli PRNU parmak izleri ile, yöntemlerle elde edilen Olympus kaynaklı anonimleşmiş görüntülere saldırıldığında ölçülen PRNU benzerliği (PCE) dağılımı (F-50 ve F-100 yalnızca hasımın elde ettiği parmak izleridir).



(a) PRNU parmak izi F-50



(b) PRNU parmak izi F-100

Şekil 4.6. Anonimliğe saldırı: Nexus ile elde edilen F-50 ve F-100 isimli nitelikli PRNU parmak izleri ile, yöntemlerle elde edilen Nexus kaynaklı anonimleşmiş görüntülere saldırıldığında ölçülen ortalama PRNU benzerliği (PCE) (F-50 ve F-100 yalnızca analizcinin elde ettiği parmak izleridir).

Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'de KKT için karar eşiği olan τ değeri kesikli çizgi ile yatay eksende paralel olarak gösterilmektedir. Yine Şekil 4.5 ve 4.6'de PCE değer dağılımlarının medyan değeri kutuların içinde düz çizgi ile çizilmektedir. Her bir dikdörtgen kutunun üst kenarı, dağılımın %75., alt kenarları ise %25. değerlerini göstermektedir. $+$ sembolü ile kutuların üstünde yer alan değerler ise her bir dağılımın dağılımlara aykırı değerleri ifade etmektedir.

Çizelge 4.11. Orijinal ve anonimleştirilmiş görüntülerin F-100 karşısındaki ortalama PRNU benzerlikleri. Hasım, anonimleştiricinin elinde olmayan F-100 isimli bir PRNU parmak izine sahiptir (Karar eşiği PCE değeri τ= 50).

Kameralar	Orijinal	LiY	ÖY-1	ÖY-2
BenQ	1171,18	845,74	11,04	22,19
Casio	933,47	623,09	3,78	5,51
Nexus	4217,29	1480,29	2,88	4,08
Olympus	2077,51	850,48	2,43	1,87
Samsung	5083,12	2694,45	7,40	1,65
Ortalama	2696,51	1298,81	5,51	7,06

Gösterilen sonuçlar, kıyaslanan yöntemler arasından, Li'lerin yönteminin farklı kaynak kamera PRNU parmak izlerine erişimi olan bir hasım karşısında en düşük başarıma sahip olduğunu göstermektedir ve aynı zamanda bu yöntemin KKT'yi engelleyemediğini göstermektedir, zira karar eşiğinin üstünde değer üreten görüntüler üretmektedir. Oysa, aynı karşılaştırma içerisinde ÖY-1 ve ÖY-2 ile anonimleştirilmiş olan görüntüler karar eşiğinin oldukça altında PRNU benzerliği üretmektedir.

Görüntü kalitesine ilişkin bir örnek vermek adına, Şekil 4.7'de bir adet görüntünün aslının ve sıra ile anonimleştirilmiş hallerinin PRNU benzerliği (PCE cinsinde) ve görüntü kalitesi değerleri verilmektedir. İlgili şekilde yer alan PCE değerleri F-100 parmak izine sahip hasımın elde edebildiği PRNU benzerlik değerlerini ifade eder. Görüntülerden, Li'lerin yöntemi ile işlenmiş olan görüntü en iyi PSNR değerine sahip iken, bir hasım karşısında anonimleştirme bakımından PCE$= 2278 >> \tau$ kadar büyük bir benzerlikle kaynak kamera ile eşleştiği için, başarısız olmaktadır. Bunnla birlikte, ÖY-1'in nispeten daha bulanık bir görüntü ürettiği ve PSNR bakımından 10dB daha başarısız olduğu görülmektedir.



(a) Orijinal
PCE:7015

(b) LiY
PCE: 2278
PSNR: 54,4dB

(c) ÖY-1
PCE: 0,0006
PSNR: 28,8dB

(d) ÖY-2
PCE: 0,8264
PSNR: 39,7dB

Şekil 4.7. Nexus ile elde edilen bir görüntünün orijinal ve anonimleştirilmiş halleri. PCE ölçümleri analizcinin erişiminde olan F-100 ile elde edilmiştir. Önerilen ÖY-1 ve ÖY-2 yöntemleri ile anonimleştirilen görüntülerle kaynak kamera tespiti mümkün değildir (PCE < 50).

Kamera ile elde edilmiş farklı görüntülere ulaşabilen bir hasım karşısında karşılaştırılan yöntemlerle işlenen görüntülerin kaç tanesinde anonimliğin korunabildiği ise yöntemlerin gürbüzlüğünü değerlendirebilmek için önemli bir ölçüttür. Benzer şekilde, farklı görüntü miktarlarıyla elde edilmiş olan, dolayısıyla farklı kalitede PRNU parmak izlerine sahip olan bir hasım karşısında yöntemlerle elde edilen görüntülerin kaçar tanesinin karar eşiğinin altında kalabildiği de gürbüzlüğün değerlendirilebilmesi açısından önemlidir. Böylece, hasımın, görüntülerin kaynağı hakkında bir bilgi edinememesi sağlanabilecektir.

Çizelge 4.12. Nitelikli bir PRNU parmak izine (F-50) sahip hasım karşısında anonimliği korunan görüntülerin yüzdesel oranları. Karar eşiği PCE değeri $\tau = 50$.

Kameralar	LiY	ÖY-1	ÖY-2
BenQ	0,0	94,2	91,3
Casio	0,0	100,0	97,5
Nexus	0,0	100,0	100,0
Olympus	1,8	100,0	100,0
Samsung	0,0	100,0	100,0
Ortalama	0,4	98,8	97,8

Bu nedenle, yöntemlerle elde edilen görüntülerin kaç tanesi ile KKT yapılabildiği ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları yüzde cinsinden iki farklı Çizelge ile gösterilmektedir. Çizelge 4.12'de, F-50 parmak izi, ile Çizelge 4.13'de ise F-100 parmak izi ile hasımın elde ettiği sonuçlar gösterilmektedir. Sonuçlara göre, bu iki alternatif parmak izine erişim olduğunda dahi, tez kapsamında önerilen yöntemler ile anonimleştirilmiş görüntüler

arasında yalnızca %,3'ünde KKT imkanı doğmaktadır.

Çizelge 4.13. Nitelikli bir PRNU parmak izine (F-100) sahip hasım karşısında anonimliği korunan görüntülerin yüzdesel oranları. Karar eşiği PCE değeri $\tau = 50$.

Kameralar	LiY	ÖY-1	ÖY-2
BenQ	0,0	94,2	89,8
Casio	0,0	100,0	97,5
Nexus	0,0	100,0	100,0
Olympus	0,0	100,0	100,0
Samsung	0,0	98,9	100,0
Ortalama	0,0	98,6	97,5

4.2.5 Görüntü Kalitesinin Yöntem Başarımına etkisi

Tezde önerilen anonimleştirme yöntemleri anonimleştirilmesi istenen görüntülerden görüntünün kendisinden elde edilen PRNU gürültüsünün, yöntemler dahilinde açıklanan şekilde hesaplanan bir β çarpanı ile çarpımının, görüntüden çıkartılmasına dayanmaktadır. Bu çarpan, görüntüde yer alan PRNU ile, kestirilen gürültü kalıntısı arasındaki farkı azaltmaktadır. Buna karşın, eğer anonimleştirilmesi istenen görüntü halihazırda kayıplı bir sıkıştırma yöntemi ile sıkıştırılarak bozuldu ise, gürültü kalıntısının kestiriminin de bozulacağı akla gelmektedir.

Hatırlamak gerekirse, önceki bölümde bahsi geçen deneylerde kullanılan tüm görüntüler, kamera ayarlarının el verdiği en yüksek görüntü kalitesi ayarı ile kaydedilmişti. Halbuki, günlük hayattta, görüntülerin en yüksek kalite ile kaydedilmesi gibi bir alışkanlık mevcut değildir. Çekilen görüntülerin kalitesi, görüntü çekilirken ilgili kameranın varsayılan ayarlarının en yüksek düşük bir kaliteye ayarlı olmasından ve daha da sıklıkla görüntünün aktarıldığı uygulama tarafından varsayılan olarak depolama alanı yahut band genişliği gibi çeşitli saiklerle düşürülmektedir.

Literatür bakımından, KKT yönteminin çeşitli kalite seviyelerinde JPEG ile sıkıştırılmış olduğunda nasıl bir başarım gösterdiği literatürde bilinmektedir. Buna karşın, sıkıştırılmış görüntülerde anonimleştirme sağlama açısından, önerilen yöntemlerin nasıl bir başarım gösterdiği konusu literatürde incelenmiş değildir. Pratikte ise, görüntüler sınırlı depolama alanı veya paylaşım kolaylığı gibi çeşitli saiklerle ve genellikle de JPEG for-

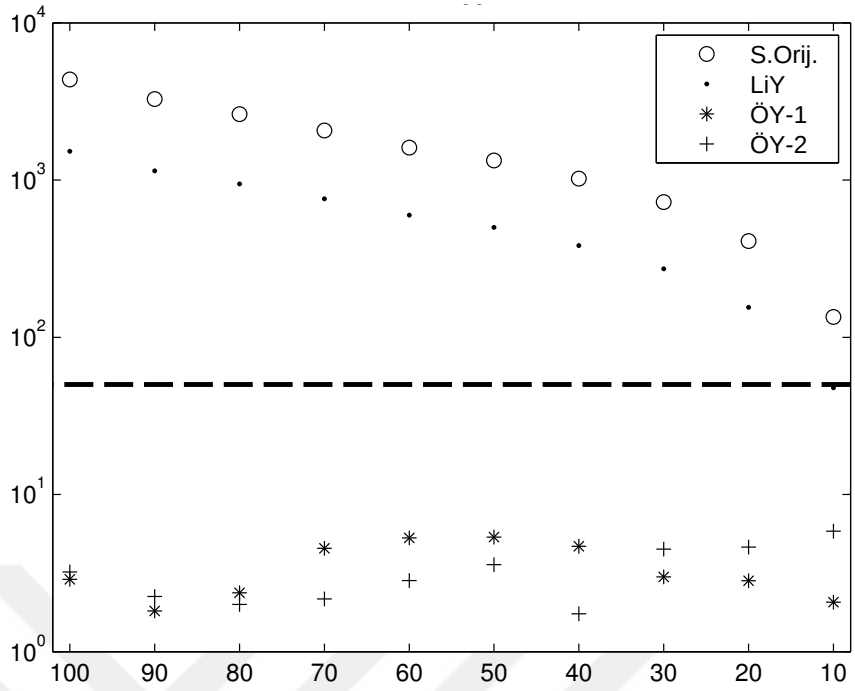
Çizelge 4.14. Karşılaştırılan yöntemlerin sıkıştırılmış görüntüler üzerinde başarımı (ortalama PCE değerleri cinsinden). Görüntüler Nexus ile çekilmiştir ve benzerlik değerler F-100 ile hesaplanmıştır. Kalite ifadesi ile gösterilen sütunlardaki değerler farklı JPEG kalitelerine tekabül etmektedir. S. Orijinal ile ifade edilen sütunda ise, yalnızca belirtilen kalitelerde sıkıştırma işlemi uygulanmış olan orijinal görüntülerden elde edilen PRNU benzerliklerinin ortalama değerleri PCE cinsinde yer almaktadır.

Kalite	S. Orijinal	LiY	ÖY-1	ÖY-2
100	4361,08	1522,91	2,89	3,21
90	3274,11	1143,35	1,82	2,25
80	2622,42	945,30	2,37	1,99
70	2067,21	758,69	4,55	2,17
60	1608,95	598,28	5,30	2,83
50	1331,72	500,22	5,35	3,58
40	1020,76	383,02	4,67	1,74
30	723,59	272,58	2,99	4,49
20	409,80	155,02	2,82	4,62
10	134,44	47,66	2,07	5,83

matında sıkıştırılmaktadır. Dolayısı ile, anonimleştirme kapsamında incelenen ve önerilen yöntemlerin çeşitli kalite ayarları kullanılarak sıkıştırılmış görüntülerde ne denli başarılı olduklarının belirlenmesi, önerilen yöntemlerin kullanışlılığını incelemek adına büyük önem arz etmektedir. Bu bölümde, bu eksikliğe cevap aranacaktır.

Bu deneyde, daha önceki bölümde kullanılan görüntülerden, Nexus ile çekilenler kullanılmaktadır. JPEG sıkıştırmanın etkisini gözlemleyebilmek için, bu kamera ile çekilmiş görüntülerden deneyler için ayrılanlar, $10, 20, \ldots, 100$ şeklinde 10 farklı kalite ayarı ile kaydedilmektedir. Önceden sunulan bulgularla karışmamaları için bu görüntülere "sıkıştırılmış temizler" denilecek ve çizelgelerde ve şekillerde "S. Orijinal" şeklinde kısaltılarak kullanılacaktır.

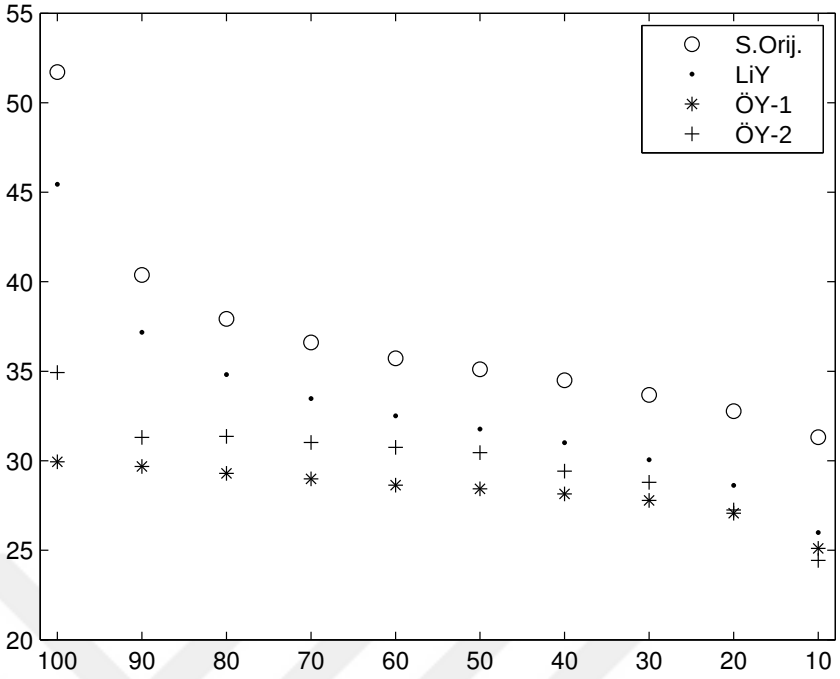
Bu deney sonucunda elde edilen kaynak kamera ile benzerliğe ilişkin bulgular PCE ölçütü cinsinde Şekil 4.8'de, görüntü kalitesine ilişkin bulgular PSNR ölçütü cinsinde Şekil 4.9'de ve SSIM ölçütü cinsinde Şekil 4.10'de verilmektedir. Aynı sıra ile, bu ölçütlerle elde edilen sonuçlar Çizelge 4.14, 4.15, ve 4.16'de de yer almaktadır. Görüntü kalitesine ilişkin sonuçlar, sıkıştırılmış asıllar ile kıyaslanarak değil, asıllar ile kıyaslanarak elde edilmektedir. PCE cinsinde elde edilen bulgular, önerilen iki yöntem ile, sıkıştırılmış görüntülerin başarılı bir şekilde anonimleştirilebildiğini göstermekte



Şekil 4.8. Yöntemlerin uygulandığı görüntülerin JPEG kalite seviyesi (yatay eksen) ile PRNU benzerliğinin ortalama PCE değerleri cinsinde değişimi (dikey eksen). Burada, "S. Orijinal" ile, temiz görüntülerin sıkıştırılmış halleri ifade edilmektedir. Görüntüler Nexus kamerasından elde edilmiştir.

iken, Li'lerin yöntemi ile anonimleştirilen görüntülerin, görüntülerin asılları ile benzer bir davranış sergileyerek PCE değerlerinin düştüğünü, ancak bu değerin karar eşiğinin altına yalnızca en düşük görüntü kalitesi bulunan görüntülerde inebildiğini göstermektedir. Bunun doğal bir sonucu olarak, ilgili deneyde Li'lerin yönteminin en düşük görüntü kalitesine sahip görüntüler kullanıldığında (JPEG kalite parametresi 10 olduğu durumda) %66 ABO'ya ulaştığı görülmüştür.

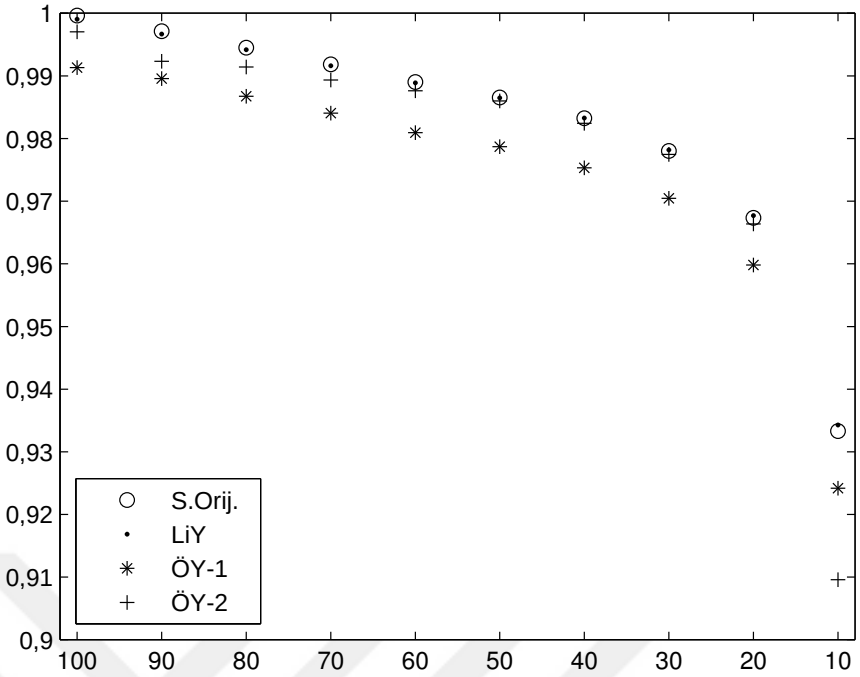
Önceki bölümde elde edilen bulgulardan farklı olarak, ÖY-2'nin ÖY-1 karşısında sahip olduğu 4dB kadar görüntü kalitesi avantajının sıkıştırılmış asılların görüntü kalitesi düştükçe azaldığı görülmektedir, lakin ortalama olarak ÖY-2 2dB üstünlüğe sahiptir (Çizelge 4.15). Ayrıca, görüntü kalitesi ölçütleri ile elde edilen bulgular (Çizelgeler 4.15 ve 4.16), Li'lerin yönteminin önerilen yöntemler karşısındaki görüntü kalitesi üstünlüğünü büyük oranda kaybettiği göstermektedir, zira Li'lerin yöntemi ile üretilen görüntülerin ortalama 10dB olan görüntü kalitesi avantajı 4dB'ye kadar düşmektedir.



Şekil 4.9. Yöntemlerin uygulandığı görüntülerin JPEG kalite seviyesi ile (yatay eksen) PSNR [dB] değerlerinin (dikey eksen) değişimi. PSNR ölçümleri temiz görüntüler (sıkıştırılmamışlar) ile karşılaştırılarak elde edilmiştir. Referans olması için, temiz görüntüler ile sıkıştırılmış temiz görüntüler arasında hesaplanan PSNR değerleri de şekilde yer almaktadır. Görüntüler Nexus kamerasından elde edilmiştir.

Çizelge 4.15. Karşılaştırılan yöntemlerin sıkıştırılmış görüntüler üzerinde başarımı (ortalama PSNR değerleri cinsinden). Görüntüler Nexus ile çekilmiştir ve kalite kıyası görüntülerin asılları ile yapılmıştır. Kalite ifadesi ile gösterilen sütunlardaki değerler JPEG seviyelerine tekabül etmektedir. S. Orijinal ile ifade edilen sütunda ise, yalnızca belirtilen kalitelerde sıkıştırma işlemi uygulanmış olan orijinal görüntülerin, görüntü asılları ile kıyaslanması ile elde edilen ortalama kalite değerleri PSNR [dB] değeri cinsinde yer almaktadır.

Kalite	S. Orijinal	LiY	ÖY-1	ÖY-2
100	51,71	45,44	29,94	34,93
90	40,38	37,18	29,68	31,31
80	37,92	34,82	29,30	31,36
70	36,61	33,47	28,99	31,02
60	35,72	32,51	28,63	30,75
50	35,11	31,77	28,43	30,45
40	34,50	31,01	28,15	29,42
30	33,68	30,05	27,78	28,79
20	32,77	28,62	27,07	27,25
10	31,32	26,00	25,10	24,44



Şekil 4.10. Yöntemlerin uygulandığı görüntülerin JPEG kalite seviyesi (yatay eksen) ile SSIM değerlerinin (dikey eksen) değişimi. SSIM ölçümleri temiz görüntüler (sıkıştırılmamış) ile karşılaştırılarak elde edilmiştir. Referans olması için, temiz görüntüler ile sıkıştırılmış temiz görüntüler arasında hesaplanan SSIM değerleri de şekilde yer almaktadır. Görüntüler Nexus kamerasından elde edilmiştir.

Çizelge 4.16. Karşılaştırılan yöntemlerin sıkıştırılmış görüntüler üzerinde başarımı (ortalama SSIM değerleri cinsinden). Görüntüler Nexus ile çekilmiştir ve kalite kıyası görüntülerin asılları ile yapılmaktadır. Kalite ifadesi ile gösterilen sütunlardaki değerler JPEG seviyelerine tekabül etmektedir. S. Orijinal ile ifade edilen sütunda ise, yalnızca satırlarda belirtilen kalitelerde sıkıştırma işlemi uygulanmış olan orijinal görüntülerin, görüntü asılları ile kıyaslanması ile elde edilen ortalama kalite değerleri SSIM değerleri cinsinde yer almaktadır.

Kalite	S. Orijinal	LiY	ÖY-1	ÖY-2
100	0,9996	0,9991	0,9913	0,9970
90	0,9971	0,9967	0,9896	0,9923
80	0,9945	0,9942	0,9867	0,9914
70	0,9918	0,9916	0,9840	0,9893
60	0,9890	0,9889	0,9809	0,9876
50	0,9866	0,9865	0,9787	0,9860
40	0,9832	0,9833	0,9753	0,9824
30	0,9780	0,9782	0,9704	0,9775
20	0,9674	0,9677	0,9598	0,9664
10	0,9333	0,9343	0,9242	0,9096

4.2.6 Gürbüzlük Testi: Önerilen yöntemlerin uç koşullar altında sınanması

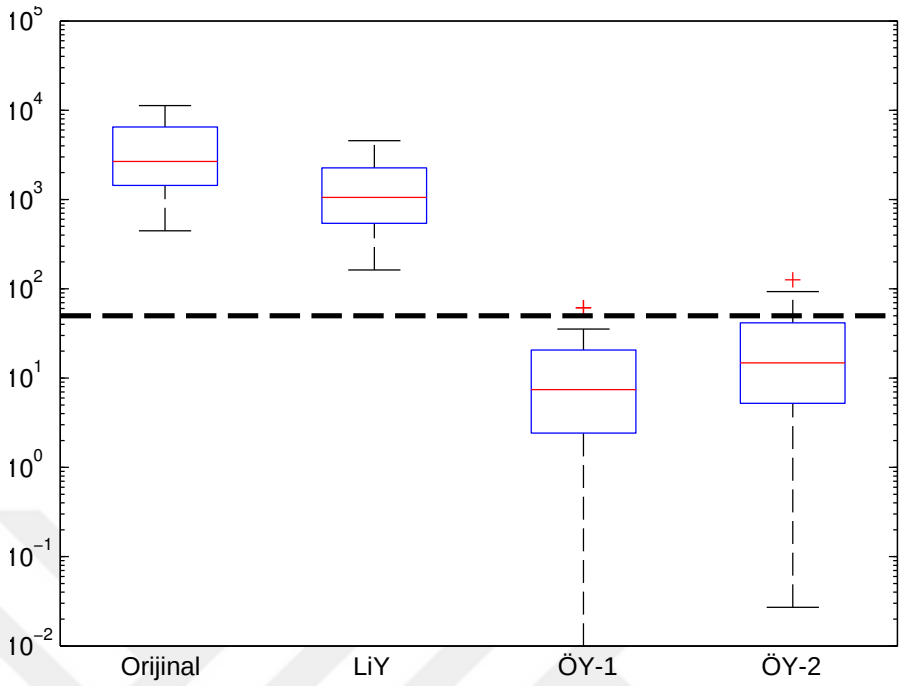
Bölümde, önerilen yöntemlerin sınırlılıklarını değerlendirebilmek için, hasım tarafa kameraya sınırsız erişim verilerek (ör. kamera ele geçirilmiş ise) dilediği kadar imge çekerek kaynak kamera PRNU parmak izi oluşturmasına izin verilmektedir. Bu durumu simüle edebilmek için, Nexus isimli kamera ile 1000 adet düz görüntü çekilmekte ve böylece çok yüksek kaliteli bir kaynak kamera PRNU parmak izi elde edilmektedir. Bu parmak izine, önceki isimlendirmeye benzer bir şekilde F-1000* adı verilmektedir. Burada "*" işareti görüntülerin yalnızca düz imgelerden elde edildiğini vurgulamak için kullanılmaktadır. Karşılaştırma için, bu 1000 adet düz imgeden 100 tanesi rasgele seçilerek, F-100* adlı bir PRNU parmak izi de hasım tarafa sunulmaktadır. Daha sonrasında bu iki PRNU parmak izi ile, tez kapsamında incelenen anonimleştirme yöntemleri anonimleştirilmiş görüntüler test edilmektedir. Burada belirtmek isteriz ki, bu görüntüler, önceki bölümlerde de kullanılmış olan $\mathbf{F_{init}}$ ile anonimleştirilmiştir. Yani anonimleştiren, herhangi bir şekilde düz imgelerden faydalanmamaktadır. Bu deneyden

Çizelge 4.17. Yöntemlerin "mükemmele yakın" iki parmak izi karşısında anonimleştirme başarımı. Değerler ortalama PCE değerleridir ve Nexus ile çekilen görüntüler ve F-100* and F-1000* ile ifade edilen görüntüler kullanılmıştır. Kıyasa tabi tüm yöntemler aynı PRNU parmak izini kullanmaktadır. Karar eşiği değeri PCE cinsinde $\tau = 50$ olarak alınmıştır. "yüzd." kısaltması ile değer dağılımının ilgili yüzdeliğini ifade etmektedir.

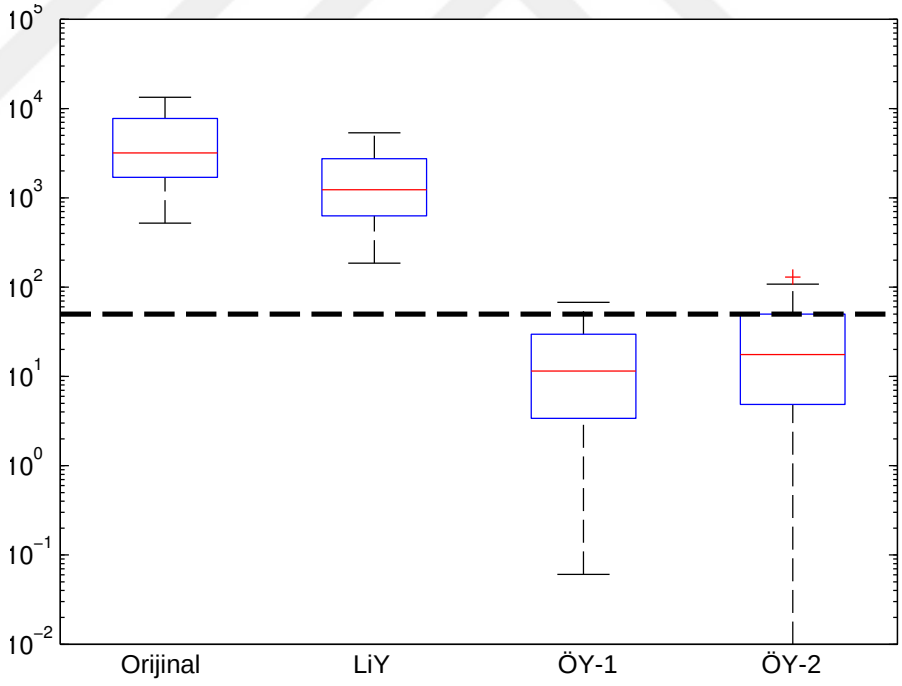
		F-100*			F-1000*	
Yöntem	25. yüzd.	Medyan	75. yüzd.	25th yüzd.	Medyan	75. yüzd.
Orijinal	1434,36	2672,85	6493,94	1694,40	3185,20	7731,76
LiY	539,96	1052,83	2262,26	628,30	1233,27	2735,75
ÖY-1	2,42	7,42	20,59	3,40	11,40	29,67
ÖY-2	5,22	14,77	41,48	4,86	17,59	49,95

elde edilen bulgular, Şekil 4.11a'de, F-100* ve Şekil 4.11b'de, F-1000* parmak izleri için ve Çizelge 4.17'de her iki kalitedeki PRNU parmak izi için verilmektedir.

Bu sınama ile elde edilen bulgulardan, önerilen yöntemlerin bu çok yüksek kalite PRNU parmak izi saldırı altında başarımlarını korudukları görülmektedir. Bununla birlikte, anonim görüntülerden ÖY-1 ile elde edilenlerle, ABO %96 olarak ölçülmesine karşın, ÖY-2 ile işlenmiş görüntülerin bu saldırı karşısındaki anonimlik başarımı F-100* için



(a) PRNU parmak izi F-100*



(b) PRNU parmak izi F-1000*

Şekil 4.11. Uç koşulda bir anonimlik kaldırma saldırısı: F-100* ve F-1000* olarak adlandırılan ve 100 ve 1000 adet farklı düz yüzey görüntüden elde edilen PRNU parmak izleri kullanıldığında karşılaştırılan yöntemlerin anonimleştirme başarımları. Değerler ortalama PCE değerleridir. Kesikli çizgi ile karar eşiği gösterilmektedir.

%84'e ve F-1000* için %76'e kadar düşmüştür. Bu durum, ÖY-1'in yüksek kalitede PRNU parmak izi ile saldırma imkanına sahip bir hasım karşısında daha iyi koruma sağladığını göstermektedir.

4.2.7 Bulguların Değerlendirilmesi

Bu bölümde üç farklı kaynak görüntü anonimleştirme yöntemine ilişkin elde edilen bulgular incelenmiştir. Bunlar, (i) PRNU parmak izi silme (Li'lerin yöntemi), (ii) Wiener domeninde uyarlamalı PRNU temizleme (ÖY-1) ve Wavelet domeninde uyarlamalı PRNU temizleme (ÖY-2) yöntemleridir. Anonimleştirilmiş görüntüler için yapılan kavramsal analiz, anonim görüntü modelindeki β katsayısının, anonimleştirme için kullanılan gürültü temizleme algoritması ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Anonimleştirilmiş görüntülerin görüntü kalitesi gürültü artığının değişintisinden dolayı PSNR cinsinde yaklaşık olarak $10log(\beta^2)$ dB kadar düşmektedir.

Değerlerlendirilen durumdan birincisi, analizcinin çekilen görüntülerle sınırlı olduğu durumdur. Bu durumda ÖY-2 ile üretilen anonimleştirilmiş görüntülerin PSNR bakımından ortalama değeri 39 dB olarak ölçülmüştür. Yine bu yöntem en yüksek PSNR değerine Casio etiketli kamera ile erişmiştir (42,6 dB), böylece ÖY-2'nin, ÖY-1'e nazaran görüntü kalitesinin arttırılması amacına ulaştığı görülmektedir. Yine benzer şekilde, ÖY-1'e göre, ÖY-2'nin en iyi β değerine daha iyi yakınsaması hedeflenmekte idi. Hatırlatmak gerekirse, anonimleştirme yöntemlerinin hedef fonksiyonu görüntülerde bulunan PRNU gürültüsünün minimize edilmesine yönelik kurgulanmaktadır, zira verilen bir görüntüden, o görüntüden elde edilen gürültü artığı bir katsayı ile çarpıldıktan sonra, çıkartılmaktadır ve en düşük PRNU benzerliğinin üretildiği katsayı aranmaktadır. Dolayısı ile, görüntüde bulunan PRNU gürültüsüne ilişkin en çok bilgiyi ayırt etmemize izin veren gürültü filtresinin en iyi β katsayısına ulaşılmasını hızlandıracağı, yani daha iyi yakınsama sağlayacaktır, ki ortalama iterasyon sayılarının yer aldığı Çizelge 4.8 bu öngörüyü doğrulamaktadır ve ÖY-2'nin, ÖY-1'e göre %10 daha az sayıda döngü ile sonlandığı görülmektedir.

Gürbüzlük testlerinde ise Li'lerin yönteminin başarımının çok düşük olduğu ortaya çık-

maktadır. Görüşümüze göre bu yaklaşımın altında yatan temel varsayım doğru olmakla birlikte, bir analizci tarafından kolaylıkla üstünden gelinebilmektedir. Bu yöntemle bir analizci karşısında gürbüzlüğünü koruyabilen anonim görüntüler üretebilmesi için şu iki koşuldan birinin sağlanması gerekmektedir: Birincisi, yöntemde kullanılan PRNU parmak izi $\hat{\mathbf{F}}$'nin, "mükemmel" bir PRNU parmak izine çok yakın olması, yani $\hat{\mathbf{F}} \approx \mathbf{F}$ şartını sağlaması gerekmektedir. Herhangi bir PRNU parmak izi kestiriminin kamera sensörünün PRNU karakteristiğini barındırdığı aşikardır, buna karşın PRNU ile bağlantılı olan ve olmayan kimi gürültüler ve görüntülerin içeriği (örneğin görüntülerin çekildiği sahnelerdeki ışık dağılımları) bu görüntülerden elde edilen $\hat{\mathbf{F}}$ kestiriminde yer bulmaktadır. Dolayısı ile, bu yöntem ile birlikte kullanılan PRNU parmak izi kestirilirken, PRNU gürültüsünün yapısı gereği farklı aydınlatma koşulları altındaki pek çok sahneden elde edilen çok sayıda görüntü ile çalışılması gerekecektir. Ayrıca, görüntü içeriğinin etkisi ve diğer kamera kaynaklı bozucu etkilerin de bir şekilde üstesinden gelinmelidir, ki yöntem gürbüz bir şekilde uygulanabilsin. Li'lerin, uyarlamalı PRNU kaldırma yönteminin bir analizci karşısında gürbüz kalabilmesi için gerekli ikinci koşul ise, anonimleştirme esnasında kullanılan PRNU parmak izinin, analizcinin eriştiği parmak izi ile birebir aynı olmasının sağlanması durumudur. Oysa ki, analizcinin hangi PRNU parmak izine sahip olduğunun önceden bilinmesi pratikte mümkün değildir.

Önerilen yöntemler, PRNU ile KKT yapılmasının önüne geçilmesinde kullanılabilecek kullanışlı ve esnek yöntemlerdir. Önerilen yöntemlerle KKT'yi engellemekte yüksek başarım elde edilebilmekte ve özellikle ÖY-2 ile bu başarım elde edilirken görüntü kalitesi daha yüksek tutulabilmektedir. Önerilen yöntemlerde gösterilen yaklaşımların daha farklı gürültü temizleme algoritmaları ya da PRNU parmak izi kestirim yöntemleri ile birlikte kullanılması mümkündür.

4.3 YE algoritması ile anonimleştirilmiş görüntülerde KKT

Tezin bu kısmına ilişkin bulgulara geçmeden önce, bulguların elde edildiği veri tabanı anlatılacaktır.

4.3.1 Görüntü Veritabanı

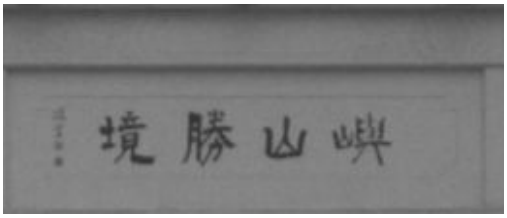
Bu deneyde kullanılan veri tabanı, Literatürde "Realistic Tampering dataset" ismi ile anılan bir görüntü veri tabanına dayanmaktadır (Korus ve Huang, 2017, 2016). Bu veri tabanında, dört adet değişik kamera ve her bir kamera için 55 tane görüntünün "temiz" (ing. pristine) ve manipüle edilmiş halleri yer almaktadır. Görüntülerin çözünürlüğü 1920×1080 olarak tektir ve görüntülerde bulunan tüm üstveriler silinmiş haldedir.

Literatürde YE ile işlenmiş görüntülerden meydana gelen bir veri tabanı bulunmadığı için, tez çalışmaları kapsamında bu veri tabanındaki görüntülere YE anonimleştirme işlemi uygulanarak bir YE görüntü veri tabanı elde edilecektir.

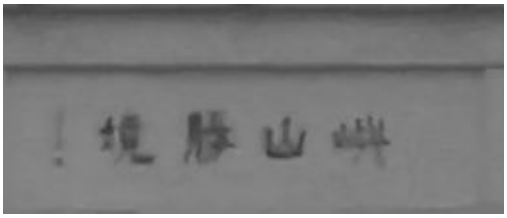
Literatürde, KKT karşıtı amaçla uygulanmış ve sonuçları bildirilmiş olan YE algoritması yalnızca gri-seviye görüntüler üretmektedir ve YE algoritmasının doğası gereği, oluşan görüntüler yama penceresi boyutundan birer eksik sayıda piksel kadar kırpılmaktadır, ki yama penceresi 8×8 olarak seçildiği için, oluşan görüntülerin her köşesinden 7 piksel kadar kırpılmaktadır. Gri-seviye sınırlılığını aşmak mümkün olmasına karşın, YE ile ilgili KKT karşıtı literatürle kıyaslanabilir olmak adına bu yapılmamıştır. Veri tabanı oluştururken ise, YE ile işlenmiş görüntülerin, temiz görüntülerle birebir kıyaslanabilir olmasının sağlanması gerekmektedir. Bunu yapmak için, YE ile görüntüler işlenirken, her bir temiz görüntü için de gri-seviyeye indirgeme işlemi ve her köşeden 7 piksel kırpma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, veri tabanında yer alan her bir görüntünün aynı boyutta ve renk düzleminde a) YE versiyonu, b) YE-olmayan versiyonu elde edilmiştir. Anlatım kolaylığı açısından, YE-olmayan görüntülere tezin devam eden kısımlarında "temiz" görüntü denecektir. Her bir temiz görüntüye karşılık, bir tane de YE görüntünün elimizde olması sayesinde, görüntülerin arasındaki çeşitli ilişkilerin incelenmesi mümkün hale gelmektedir. Örnek görüntüler Şekil 4.12'de gösterilmektedir.

Tez kapsamında YE görüntülerle zenginleştirilmiş olan bu veri tabanı, ilgili makale yazarlarının izni alınarak açık-kaynak olarak kamuya sunulmuştur (Korus ve Huang, 2016, 2017). İlgilenen araştırmacılar, dipnotta verilen web adresinden[1] veri tabanına

[1] http://github.com/akarakucuk/2019_PM_SCI_DATA/



(a) Orijinal görüntü, PCE=2646



(b) YE görüntü, PCE=5,6, 36dB, BPO=%83



(c) Orijinal görüntü, PCE=1531



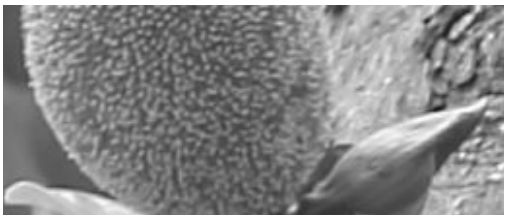
(d) YE görüntü, PCE=0,2, 35dB, BPO=%86



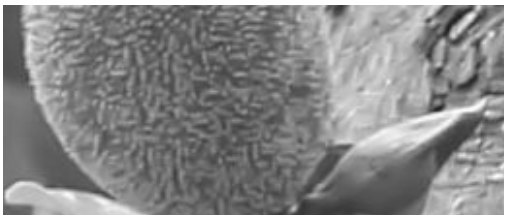
(e) Orijinal görüntü, PCE=872



(f) YE görüntü, PCE=4,8, 30dB, BPO=%90



(g) Orijinal görüntü, PCE=1502



(h) YE görüntü, PCE=-0,9, 35dB, BPO=%84

Şekil 4.12. Örnek görüntüler. İlk sutunda temiz görüntüler, ikinci sutunda ise YE görüntüler yer almaktadır. Buna ilave olarak, birinci satırda yer alan görüntüler A57, ikincisinde yer alan görüntüler D7000, üçüncü D90 ve son satırda yer alanlar ise 60D ile çekilmiştir. Her bir YE görüntünün altında, ilgili görüntünün kalitesine ilişkin PSNR [dB] ve işlem sonucu elde edilen görüntüye ilişkin Denklem 3.19 ile hesaplanan BPO değeri yer almaktadır. BPO değerinin tanımı Bölüm 3.2.1'den görülebilir. Bu görüntülerdeki farklılıkların daha iyi görülebilmesi için görüntüler 158×158 piksel boyutuna kırpılmıştır ve sayfaya sığabilmesi için yarım ölçekle gösterilmiştir.

Çizelge 4.18. YE Görüntü veri tabanının özellikleri. BPO bozulmamış piksel oranının kısaltmasıdır ve YE işlemi ile bozulan piksellerin görüntüde yer alan bütün piksel adetine oranını ifade etmektedir. Çizelgede medyan değerler gösterilmektedir.

Kamera		Görüntü	PCE		PSNR	BPO
Marka	Model	Sayısı	Orijinal	YE	[dB]	[%]
Sony	A57	29	1963	1,05	38	85
Nikon	D7000	30	888	2,92	36	78
Nikon	D90	27	1231	0,14	33	86
Canon	60D	30	1289	1,91	34	86

ulaşabilmektedir. Yayınlanan veri tabanında, görüntüler araştırmacıların görüntüleri ayırt edebilmeleri için belirli bir şekilde isimlendirilmiştir. Orijinal olanlar, "out-pm-before-dosyaadı.uzantısı" şeklinde isimlendirilirken, YE görüntüler ise, "out-pm-after-dosyaadı.uzantısı" şeklinde isimlendirilmiştir.

Orijinal görüntülerin 25 tanesi rasgele seçilerek kaynak kamera PRNU parmak izi $\mathbf{F}_{\text{q}}$ kestirimi için kullanılmaktadır. Geriye kalan görüntüler ise testler için ayrılmaktadır.

Çizelge 4.18 ve Şekil 4.13'de, tezin bu kısmında bulguları aktarılacak deneylerde yer alan görüntülerin elde edildiği kameraların marka model bilgileri yer almaktadır. Ayrıca, bu deneyler için ayrılan görüntülere ilişkin çeşitli ilk bulgular ve dağılımları yer almaktadır. Çizelge 4.18'da kamera markaları ve modelleri yer almaktadır. Çizelgede, PCE sekmesinde yer alan satırlarda, YE görüntülerin ve bu görüntülere karşılık gelen temiz görüntülerin kaynak kamera PRNU-izi $\mathbf{F}_{\text{q}}$ ile aralarındaki benzerlik PCE cinsinde gösterilmektedir. Çizelgede yer alan değerlerin hepsi medyan değerler iken, tüm görüntülerle elde edilen PRNU benzerliği değerleri (PCE) ve görüntü kalitesi (PSNR) dağılımları Şekil 4.13'de gösterilmektedir.

Görüntü sayısı kısmında ise, deneylerde kullanılan YE görüntülerin adeti yer almaktadır. Hatırlatmak gerekirse, her bir kamera için 55 adet görüntüden, 25 adeti ile her bir kamera için birer $\mathbf{F}_{\text{q}}$ elde edilmişti. Kalan 30 adet görüntü ise deneyler için ayrılmıştı. Buna karşın bu iki kamerada deneyler için ayrılan görüntülerin toplam 4 tanesi (1 tanesi A57, 3 tanesi D90 kamerasından gelen), Yama Eşleştirme yöntemi ile anonimleştirilmiş olmalarına karşın halen KKT yapılabilir halde kalmaktadır. Dolayısı ile bu

Çizelge 4.19. Senaryo #1, YE görüntü alt kümelerinin medyan ve en yüksek PCE değerleri. n=1* ile ifade edilen durum bir alt kümeyi ifade etmemektedir ve yalnızca kıyaslama için verilmiştir. Karar eşik değerinin üstündeki değerler kalın harfle yazılarak vurgulanmaktadır.

Kamera	Medyan PCE					En yüksek PCE				
Etiket	n=1*	n=5	n=10	n=15	n=20	n=1*	n=5	n=10	n=15	n=20
A57	1,1	14,3	36,0	51,6	77,0	45,3	**82,7**	**80,6**	**94,1**	**109,3**
D7000	2,9	11,5	18,2	36,0	45,9	23,7	48,1	**63,2**	**71,9**	**83,9**
D90	0,1	3,7	7,4	9,7	12,6	27,9	**55,7**	43,8	35,9	27,9
60D	1,9	13,1	22,3	33,3	47,2	32,1	**54,2**	**52,5**	**80,6**	**79,9**

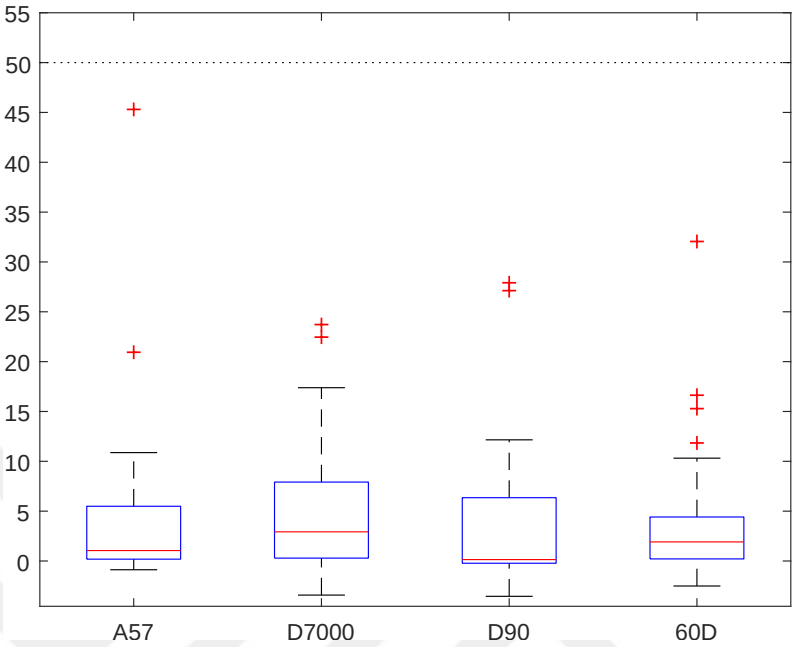
görüntüler ilgili kameranın sorgulanan kamera olduğu durumlarda deney görüntüleri arasından çıkarılmıştır ve Çizelge 4.18'de gösterilen adet kadar görüntü ile çalışılacaktır.

Şekil 4.13'de, görüntülere ilişkin Çizelge 4.18'de verilen değerlerin dağılımları gösterilmektedir. YE görüntülerin yüksek BPO değerlerine karşın 38 dB'ye kadar kabul edilebilir yükseklikte PSNR değeri bulunmaktadır ve bununla birlikte düşük PCE değerleri gözlemlenmektedir. Bu durum, YE tabanlı anonimleştirme yönteminin başarımını göstermektedir.

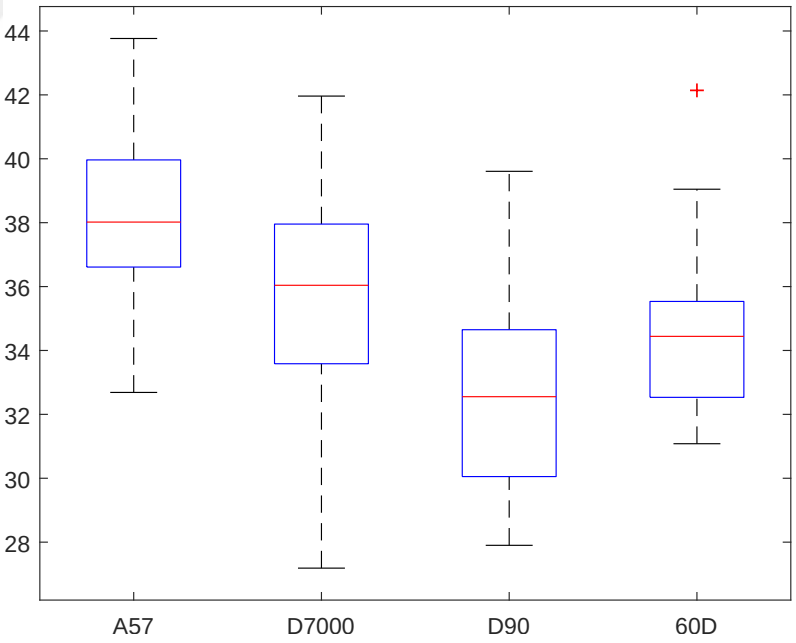
4.3.2 Saldırı Senaryosu #1: Homojen YE görüntü yığınında KKT

Bu senaryoda, kayıt ortamında yalnızca sorgulanan kameradan gelen YE görüntülerin olduğu durum değerlendirilmektedir ve bu nedenle bir analizcinin karşılaşabileceği en net durumu ifade etmektedir. Hatırlatmak gerekirse, kayıt ortamındaki görüntülerden 5'er, 10'ar, 15'er ve 20'şerli alt küme büyüklükleri ile, 100'er defa örnek alınmakta ve bu alt kümelerden bir KKT kararına ulaşılmaya çalışılmaktadır.

Çizelge 4.19'de önerilen yöntemin sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlara bakıldığında, yalnızca birkaç halde KKT yapılamadığı görülmektedir. Özel olarak, D90 isimli kameradan elde edilen görüntülerde beklenmeyen bir bulgu gözlenmektedir, zira küme büyüklüğü n arttıkça, yöntem başarımı azalmaktadır. Bu duruma ilişkin bir olası açıklama, bu kameraya has olarak başlangıç durumunda (bkz. Çizelge 4.18) görüntülerin medyan PCE değerinin $(0,14)$ diğer kameralardan düşük olmasıdır. Bu değer, bu kamera ile



(a) Her bir kamera için PRNU benzerliğini gösteren PCE değer dağılımları



(b) Her bir kamera için görüntü kalitesini ifade eden PSNR değer dağılımları

Şekil 4.13. Literatürde bulunan YE yöntemi kullanılarak elde edilen görüntülerin PRNU benzerliğinin PCE ve görüntü kalitesinin PSNR [dB] değerleri cinsinden dağılımları.

Çizelge 4.20. Senaryo #1 Birleştirilmiş kümelerin detayları. Sonuç elde edilemeyen, dolayısı ile birleştirilmiş kümesi boş kalan durumlar "–" ile ifade edilmektedir. PCE yazılı sutun Φ_p'in PRNU benzerliğini ifade etmektedir.

Kamera		Birleştirilmiş Küme		Geri Çağırma	
Etiket	n	$\lvert\Phi_p\rvert$	PCE	Adetler	[%]
A57	5	22	100,2	22/29	76
	10	29	100,0	29/29	100
	15	29	100,0	29/29	100
	20	29	100,0	29/29	100
D7000	5	–	–	–	–
	10	16	83,2	16/30	53
	15	30	67,3	30/30	100
	20	30	67,3	30/30	100
D90	5	5	55,7	5/27	18
	10	–	–	–	–
	15	–	–	–	–
	20	–	–	–	–
60D	5	9	82,8	9/30	30
	10	24	81,7	24/30	80
	15	30	68,7	30/30	100
	20	30	68,7	30/30	100

elde edilen yöntem başarımına en yakın başarımı gösteren A57 kamerasından gelen YE görüntülerden elde edilenin (ki A57'nin medyan PCE değeri $1,01$ olarak ölçülmüştür) sekizde biri kadardır. Bu tek kamera için Şekil 4.13'e bakıldığında, PCE değerlerinin dağılımı da hem PCE hem de PSNR değerleri bakımından benzer bir görüntü vermektedir. Bu bulgudan, D90 ile elde edilen görüntülerin YE algoritması tarafından ekseriyetle daha iyi bir şekilde anonimleştirildiği anlaşılmaktadır, zira bu kamera için yalnızca en küçük alt küme büyüklüğü $n = 5$ için KKT karar eşiğinin üstüne çıkan bir YE görüntü kümesi elde edilebilmiştir. Bu ve diğer bulgular Çizelge 4.20'de daha detaylı bir şekilde gösterilmektedir.

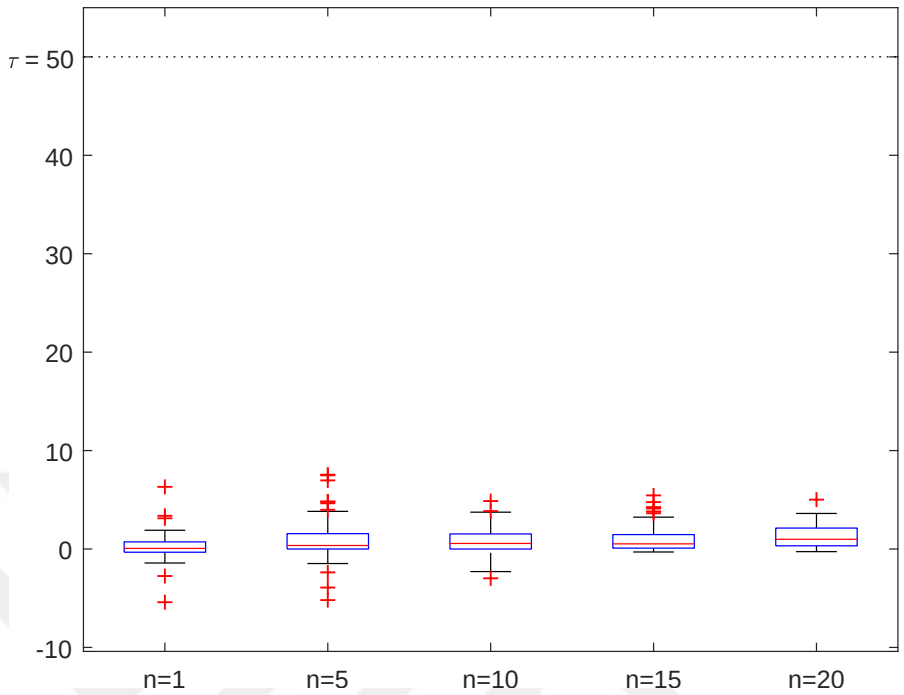
Çizelge 4.20'de birleştirilmiş kümelerden elde edilen sonuçlar, her bir kamera ve alt küme büyüklüğü (n) için kırılımlarla gösterilmektedir. Bu senaryo için, birleştirilmiş kümeler, Algoritma 1'de S_β'nin sabit bir şekilde $\varnothing$ ile ayarlanması ile oluşturulmaktaktadır. Çizelge 4.20'de $\lvert\Phi_p\rvert$ her bir birleştirilmiş kümenin görüntü sayısını ve bu görüntülerle elde edilen PRNU parmak izinin, analizcinin elindeki kamera PRNU parmak

izi ile arasındaki benzerliği PCE cinsinde göstermektedir. Doğruluk değeri ise Denklem 3.22'de gösterildiği gibi hesaplanmakta ve yüzde ve kesir cinsinde gösterilmektedir. Çizelgede, "–" ile işaretlenmiş satırlar yer almaktadır. Bu satırların bulunduğu durumlar, ilgili deney kısmında birleştirilmiş kümenin boş kaldığını, yani oluşmadığını göstermektedir. Örneğin D7000 kamerasında, $n = 5$ için bu durum mevcuttur. Yani, bu kamera ile çekilen YE görüntülerin $n = 5$ büyüklüğünde seçilen 100 adet alt kümesinden hiç birisi PCE karar eşiği τ'dan büyük bir değer üretmemektedir. Bu Çizelgede de, D90 kamerası ile karşılaşılan ve daha önce de anlatılan durum gözlemlenebilmektedir. Dikkat edilirse, $n = 5$ durumunda, sadece beş elemanlı bir birleştirilmiş küme $|\Phi_p|$ elde edilebilmiştir. Buna karşın, D90 için diğer küme büyüklüklerinde böyle bir gözlemin yapılamamış olması, $n = 5$'de gözlenen durumun sadece geçici bir durum olduğunu, genel olarak bu kamera ile elde edilen YE görüntülerle KKT yapılamadığını göstermektedir.

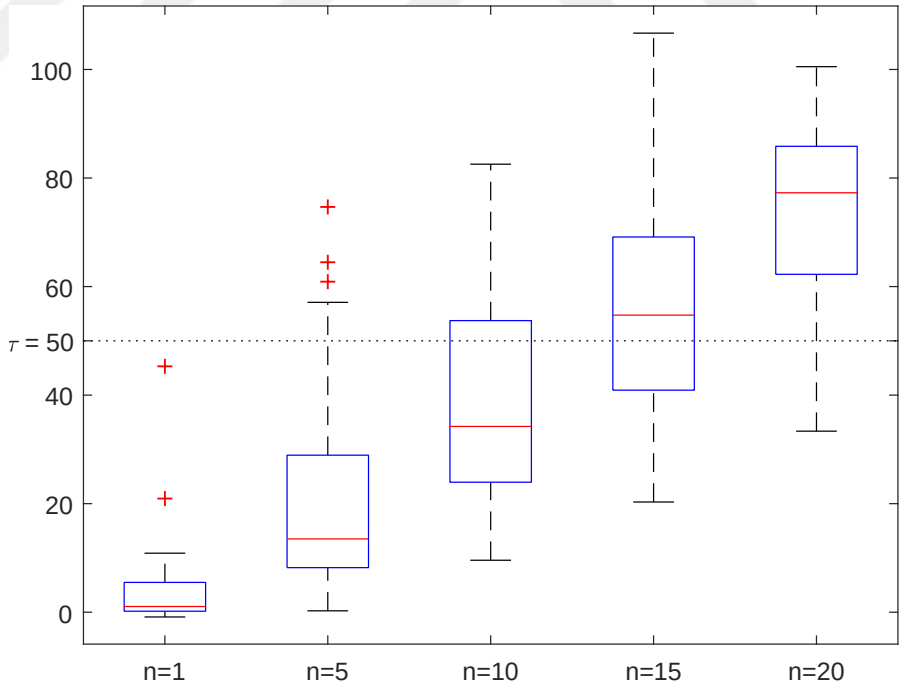
Diğer taraftan, sorgulanan kamera haricindeki kameralarla çekilen YE görüntülerin, sorgulanan kamera PRNU parmak izleriyle benzerlikleri de incelenmiştir ve beklendiği gibi, bu türdeki hiçbir görüntünün karar eşiğinin üstünde PCE değeri üretmediği görülmüştür. Eşleşen ve eşleşmeyen kameralarla elde edilen bu sonuçlar, iki seçili kamera için Şekil 4.14'de gösterilmektedir. Şekil 4.14(a)'da, 60D YE görüntülerinin A57'den elde edilen $\mathbf{F}_{\mathrm{q}}$ ile PRNU benzerlik değerlerinin dağılımı yer almaktadır. Şekil 4.14(b)'de ise, A57 ile elde edilen YE görüntülerin yine A57'den elde edilen PRNU parmak izi $\mathbf{F}_{\mathrm{q}}$ ile benzerliğinin dağılımı yer almaktadır. Şekil 4.14'de en solda yer alan kümenin eleman sayısı $n = 1$ olup, bir alt kümeyi ifade etmemektedir; yalnızca yöntem uygulanmadığı halde elde edilen görüntü başına PRNU benzerliği dağılımının görülebilmesi için verilmiştir. Eşleşmeyen kameralara ilişkin sonuçların hepsinin karar eşiğinin altında değer ürettiği gözlemlendiği için tezin devamında bu sonuçlardan bahsedilmeyecektir.

4.3.3 Saldırı Senaryosu #2: Heterojen YE görüntü Yığınında KKT

Bu senaryoda, önerilen yöntemin, kayıt ortamında sorgulanan kamera haricinde bir kameradan elde edilen YE görüntülerin, sorgulanan kamera ile elde edilen YE görün-



(a) Eşleşmeyen kamera YE görüntüleri.



(b) Eşleşen kamera YE görüntüleri.

Şekil 4.14. Eşleşmeyen ve eşleyen kameralardan elde edilen ve çeşitli uzunluklardaki ($n = |S_k|$) YE görüntü alt kümelerinin PRNU benzerliği dağılımları (PCE).

tülerle birlikte aynı kayıt ortamında bulunması halinde nasıl bir başarım göstereceği incelenmektedir. Dolayısı ile incelemede, biri analizcinin sorguladığı, öteki ise bilinmeyen (yabancı) kameradan mütevellit olan bir kamera çifti dikkat alınacaktır.

Her bir kamera çifti, bir farklı durum olarak değerlendirilecektir ve Çizelge 4.21'de bu durumlar listelenmektedir. Örneğin, Durum 1, kayıt ortamında hem A57 kamerasından, hem de D7000 kamerasından görüntülerin bulunduğu durumu göstermektedir. Bu iki kamera ile elde edilen tüm görüntüler (59 adet görüntü) kullanılarak elde edilen parmak izi ile, sorgulanan kameranın (A57) PRNU parmak izi arasındaki benzerlik, PCE cinsinde 32,5 olarak elde edilmektedir ve bu değer, PCE S_{Σ} sütununda gösterilmektedir. Buradaki S_{Σ} sembolü ile, iki farklı kameradan gelen görüntülerin tamamı ifade edilmektedir. Farklı durumlar, Algoritma 1'de p karakteri ile ifade edilmektedir ve bu karakter de 1 ile 12 arasında değer almaktadır. Her bir durum için, deneyin önceki anlatımında da olduğu gibi, alt küme boyutları 5 ile 20 arasında beşer artımlı olarak değişmeke ve her bir durum ve alt küme boyutu için $K = 100$'er adet alt küme rasgele seçilerek doldurulmaktadır. Sonuç olarak, Algoritma 1'deki parametreler, p=1, 2, ..., 12, n=5, 10, 15, 20 and k=1, 2, ..., 100 aralığında değişmektedir.

Durum 3 ve 5'de, kümelerde yer alan görüntülerin PRNU gürültülerinin doğrudan birleştirilmeleri halinde karar eşiğinin üstünde bir PRNU benzerliğinin oluştuğu görülmektedir, ki, bu aynı zamanda, farklı kameradan gelen YE görüntülerin kolaylıkla sorgulanan kameradan gelen YE görüntülerle karıştığını gösterdiği için oldukça ilgi çekicidir. Önerilen yöntem kullanıldığında ise, bu 12 farklı durumun 6 tanesinde %100 doğruluğa ulaşmak mümkün olacaktır. Bu yüksek doğruluğun elde edildiği durumlar Çizelge 4.23'de yer almaktadır.

Çizelge 4.21'de, listenen her bir durum için, çeşitli boyutlardaki alt kümelerden elde edilen PRNU izleri ile, sorgulanan kameranın PRNU parmak izi $\mathbf{F}_{\mathrm{q}}$ arasındaki benzerliğin medyan ve maksimum değerleri PCE cinsinde Çizelge 4.22'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.22'da, tüm alt kümelerin benzerlik değerleri gösterilmektedir. Koyu yazılmış

Çizelge 4.21. Senaryo #2: Durumların özellikleri. En sağda yer alan sutun iki kameradan da elde edilen görüntüler toplu olarak birleştirildiğinde ölçülen PCE değerini ifade etmektedir. Sorgulanan kamera ile çekilmiş olan YE görüntülerin adeti $|S_\alpha|$ ile ifade edilirken, diğer kamera ile çekilmiş olan karışık görüntüler (YE görüntü ile temiz görüntüler birlikte) görüntü adeti $|S_\beta|$ ile gösterilmektedir.

Durum	Kamera Etiketleri				S_Σ
No	Sorgulanan	Bilinmeyen	$\|S_\alpha\|$	$\|S_\beta\|$	PCE değeri
1	A57	D7000	29	30	32,5
2	A57	D90	29	30	30,7
3	A57	60D	29	30	**78,3**
4	D7000	A57	30	30	25,6
5	D7000	D90	30	30	**57,0**
6	D7000	60D	30	30	23,2
7	D90	A57	27	30	12,1
8	D90	D7000	27	30	6,2
9	D90	60D	27	30	4,3
10	60D	A57	30	30	45,9
11	60D	D7000	30	30	26,0
12	60D	D90	30	30	40,1

Çizelge 4.22. Senaryo #2: Yöntem kullanılarak ulaşılan PCE cinsi PRNU benzerlik değerleri. Karar eşik değerini aşan değerler kalın harfle vurgulanmıştır. n=1* ile gösterilen sutunlar kıyaslama amaçlı olarak verilen tekil görüntü istatistikleridir, dolayısıyla bu sutunda yer alan en yüksek değerler Senaryo #1'de gösterilen değerler ile aynıdır.

Durum	Medyan PCE					En yüksek PCE				
No	n=1*	n=5	n=10	n=15	n=20	n=1*	n=5	n=10	n=15	n=20
1	0,2	2,1	5,1	5,6	11,2	45,3	41,8	**52,7**	33,9	39,7
2	0,1	1,5	6,0	7,8	11,0	45,3	**65,1**	37	41,3	44,6
3	0,5	6,0	14,8	19,8	23,8	45,3	47,7	**59,3**	**66,5**	**74,6**
4	0,1	3,2	5,5	6,6	10,5	23,7	36,6	32,7	49,5	39,2
5	0,6	5,3	11,9	14,1	19,5	23,7	35,5	**58,2**	**63,4**	**54,3**
6	0,3	2,7	3,8	6,8	6,2	23,7	24,9	33,7	37,6	**50,2**
7	0,2	0,9	2,6	4,4	4,4	27,9	19,5	27,3	21,1	24,2
8	0,0	0,8	1,5	2,1	3,5	27,9	34,4	19,4	19,7	33,3
9	0,0	0,3	0,7	2,0	2,4	27,9	34,7	30,2	31	21,6
10	1,0	4,2	7,3	11,8	15,3	32,1	39,3	45,3	43,6	**57,2**
11	0,7	2,4	3,9	7,0	9,1	32,1	25,4	32,6	27,1	35,6
12	0,2	2,6	6,8	10,0	13,6	32,1	31,2	44	39,1	45,6

Çizelge 4.23. Senaryo #2: Birleştirilmiş kümelerinin detayları. Sonuç elde edilemeyen, dolayısı ile birleştirilmiş kümesi boş kalan durumlar "–" ile ifade edilmektedir.

Durum		Birleştirilmiş Küme		Doğruluk	
No	n	$\lvert\Phi_p\rvert$	PCE	Adetler	[%]
1	10	10	52,7	9/10	90
2	5	5	65,1	5/5	100
	10	26	92,1	18/26	69
3	15	46	92,4	26/46	57
	20	47	90,2	26/47	55
4	–	–	–	–	–
	10	10	58,2	4/10	40
5	15	24	77,9	16/24	67
	20	33	64,5	17/33	52
6	20	20	50,2	14/20	70
7	–	–	–	–	–
8	–	–	–	–	–
9	–	–	–	–	–
10	20	32	63,3	18/33	59
11	–	–	–	–	–
12	–	–	–	–	–

değerler, bu değerlerden karar eşiğinin üstüne çıkabilenleri göstermektedir. Pek çok durumda, alt kümelerin karar eşiğini aşamadığı görülmektedir, lakin karar eşiğini aşan alt kümelerde yer alan görüntüler ile, her bir n ve p değeri için ayrı ayrı birleştirilmiş küme Φ_p oluşturulmaktadır. Bu kümelerden elde edilen bulgular ve birleştirilmiş kümelerde yer alan görüntü adetleri ve Denklem 3.23 ile hesaplanan Doğruluk (Precision) oranları her bir durum için Çizelge 4.23'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.23'de gösterilen durumlardan sadece ikisinde (Durum 3 ve 5) birden çok uzunlukta (n=10,15 and 20) alt kümede birleştirilmiş küme oluşabilmiştir. Bu gözlem, birleştirilmiş kümelerde yer alan görüntülerin bir kere daha elenmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Bu eleme işlemi, farklı boyutlardaki n alt kümelerin kesişimi alınarak gerçekleştirilebilir. Eleme gerçekleştirildiğinde, $|\Phi_{p=3}| = 18$ boyutunda bir birleştirilmiş küme kalmaktadır ki, bu görüntülerin 14 tanesi de sorgulanan kameradan gelmektedir. Bu durumda Doğruluk (Precision) oranı %78'e çıkmaktadır. Durum 3'de bu eleme yapılmadan evvel elde edilebilen maksimum Doğruluk (Precision) oranının

Çizelge 4.24. Senaryo #2: Alt küme uzunluğu n ile KKT başarımının karşılaştırılması.

	Durumlar	T.Doğruluk		T.Geri Çağırma		Seçilim		Ortalama
n	C	Adetler	[%]	Adetler	[%]	Adetler	[%]	$\lvert\Phi\rvert$
5	2	5/5	100	5/29	17	5/59	8	5
10	1,3,5	31/46	67	31/88	35	46/178	26	15
15	3,5	42/70	60	42/59	71	70/119	59	35
20	3,5,6,10	76/132	58	76/119	64	132/239	55	33

%69 olduğu dikkate alındığında, bu kayda değer bir iyileşme sağlamaktadır. Benzer şekilde, Durum 5'de, eleme yapılması halinde Doğruluk (Precision) oranı 4/6 ve %67'ye çıkmaktadır, ki bu Durum için $n = 15$ boyutunda alt kümelerden elde edilen en yüksek Doğruluk (Precision) oranı ile aynıdır. Bu şekilde eleme yapılması yüksek kritiklikte karar verilirken önerilen yöntem çıktılarının kullanılmasına izin vermektedir.

Çizelge 4.24'de, önerilen yöntemin bu senaryodaki genel başarımına ilişkin bulgular, birleştirilmiş kümelerin oluşabildiği her bir n ve p değeri için özetlenmektedir. "Ortalama |Φ|" ile birleştirilmiş kümelerin ortalama uzunlukları gösterilmektedir. Çizelgede yer alan T.Geri Çağırma, T. Doğruluk ve Seçilim değerleri sırasıyla Denklem 3.25, 3.26 ve 3.24 ile hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.24'de yer alan bulgular, en çok sonuç üretilen alt küme büyüklüğünün $n = 20$ olduğunu göstermektedir. Buna karşın, bu alt küme boyutu, aynı zamanda en düşük Toplam Doğruluk değerini de üretmektedir. En iyi Toplam Doğruluk değeri ise $n = 5$ için elde edilmiştir. Bu beklenen bir sonuçtur, zira karar eşiğinin üstünde PRNU benzerliği üreten alt kümelere daha çok eklendikçe, yabancı kaynaklı görüntülerin bu alt kümeye alınma ihtimali de artmaktadır. Bu bulgu, rasgele doldurulan alt küme adetinin (K) daha küçük alt kümeler (n için) arttırılmasının iyi bir ödünçleşme olacağını göstermektedir. Alt küme adetinin başarıma etkisi önümüzdeki bölümde incelenecektir.

4.3.4 Küme Sayısının Arttırılmasının KKT başarımına etkisi

Bu bölümde alt küme adeti K'nın değişiminin yöntem başarımını nasıl etkilediği incelenecektir. Önceki kısımlarda verilen bulguların hepsinde alt küme sayısı 100 ile sınırlandırılmıştı. Bu bölümde, daha küçük alt küme sayıları ile birlikte incelenen iki

Çizelge 4.25. Toplam Geri Çağırma oranlarının örneklenen alt kümelerin sayısına (K) ve alt kümelerin uzunluklarına (n) göre değişimi. Yüzde işaretinin bulunduğu sutunda verilen değerler ortalama geri çağırma oranlarıdır ve Denklem 3.25 ile hesaplanmıştır. C ile ifade edilen sutunda yer alan sayılar ise birleştirilmiş kümesi oluşturulabilmiş olan kamera adetlerini ifade etmektedir.

	$n=5$			$n=10$			$n=15$			$n=20$		
K	$\lvert\Phi_p\rvert$	[%]	C	$\lvert\Phi_p\rvert$	[%]	C	$\lvert\Phi_p\rvert$	[%]	C	$\lvert\Phi_p\rvert$	[%]	C
10	5	17	1	15	52	1	20	66	3	29	99	3
20	7	22	2	25	86	1	26	87	3	30	100	3
30	9	29	2	29	100	1	26	88	3	30	100	3
40	9	29	2	20	66	2	28	96	3	30	100	3
50	9	29	2	20	66	2	29	99	3	30	100	3
60	12	41	2	19	63	3	29	99	3	30	100	3
70	14	47	2	20	67	3	29	99	3	30	100	3
80	14	47	2	22	74	3	29	99	3	30	100	3
90	14	47	2	22	74	3	30	100	3	30	100	3
100	12	42	3	23	78	3	30	100	3	30	100	3

senaryo için elde edilen bulgular Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26'de gösterilecektir. İki Çizelgede de, sonuçlar K ve n üzerinden özetlenmektedir

Senaryo #1'de, K parametresinin etkisi Çizelge 4.25'de gösterilmektedir. Bu Çizelgede, Toplam Geri Çağırma (Total Recall) oranı değerleri "%" sembolü ile işaretli sütunlarda yer almaktadır, $|\Phi_p|$ ile ortalama birleştirilmiş küme eleman sayısı gösterilmektedir. "C" sembolünün olduğu sütunda da, veri tabanındaki kameralardan kaçı ile sonuç elde edilebildiği gösterilmektedir.

Senaryo #2'de, K parametresinin etkisi Çizelge 4.26'de gösterilmektedir. Bu Çizelgede, Toplam Doğruluk (Total Precision) oranı değerleri "%" sembolü ile işaretli sütunlarda yer almaktadır, $|\Phi_p|$ ile ortalama birleştirilmiş küme eleman sayısı gösterilmektedir. "C" sembolünün olduğu sütunda da, incelenen durumlardan kaçı ile sonuç elde edilebildiğini gösterilmektedir. birleştirilmiş kümelerin oluşmadığı durumlar "–" işareti ile gösterilmektedir.

Çizelge 4.26. Toplam doğruluk oranlarının örneklenen alt kümelerin sayısına (K) ve alt kümelerin uzunluklarına (n) göre değişimi. Yüzde işaretinin bulunduğu sutunda verilen değerler ortalama geri çağırma oranlarıdır ve Denklem 3.26 ile hesaplanmıştır. C ile ifade edilen sutunda yer alan sayılar ise birleştirilmiş kümesi oluşturulabilmiş olan kameraların adetini ifade etmektedir.

	$n=5$			$n=10$			$n=15$			$n=20$		
K	$\lvert\Phi_p\rvert$	[%]	C	$\lvert\Phi_p\rvert$	[%]	C	$\lvert\Phi_p\rvert$	[%]	C	$\lvert\Phi_p\rvert$	[%]	C
10	–	–	–	10	40	1	15	73	1	34	59	1
20	–	–	–	10	63	3	15	70	2	41	59	1
30	–	–	–	13	66	3	15	70	2	37	55	2
40	–	–	–	13	66	3	15	70	2	37	55	2
50	–	–	–	13	66	3	26	61	2	30	58	4
60	–	–	–	13	66	3	26	61	2	30	58	4
70	–	–	–	13	66	3	30	60	2	33	58	4
80	–	–	–	13	66	3	33	61	2	33	58	4
90	5	100	1	15	67	3	35	60	2	33	58	4
100	5	100	1	15	67	3	35	60	2	33	58	4

4.3.5 Bulguların Değerlendirilmesi

Bu bölümde, Yama-Eşleştirme (kst. YE, ing. Patch-Match) algoritması ile işlenmiş görüntülerde nasıl KKT yapılabileceğine ilişkin bir yöntem açıklanmıştır. Bu yöntem literatür bakımından ilktir. YE algoritması, esasen görüntülerin yeniden düzenlenmesi (ing. inpainting) için geliştirilmiş olmasına karşın, yakın zamanda PRNU tabanlı KKT karşıtı kullanımı başarılı bir şekilde gösterilmiştir. Doğası gereği, bu algoritma görüntüde yer alan noktaların çoğunluğu (%86'ya yakın bir kısmını) değiştirmekte olduğundan, görüntüden elde edilen PRNU gürültüsünün dağılımını bozmakta ve kaynak kamera PRNU parmak izi ile arasındaki eşleşmeyi ciddi derecede azaltmaktadır. Bu sayede, açıklanan bulgulardan da görülebileceği gibi, YE ile işlenmiş görüntülerde PRNU tabanlı KKT yapılamaz hale gelmektedir (deneyde kullanılan görüntülerin %97 kadarında KKT yapılamamıştır).

Tez kapsamında geliştirilen yöntem ile, bu gibi görüntülerin kaynaklarının belirlenebilmesi için görüntülerin sabit adetli ve küçük boyutlu alt kümelere ayrılması ve bu kümeler üzerinden alışılmış PRNU benzerlik ölçütünden faydalanılması ve bu ölçüt ile elde edilen değerlere göre alt kümelerin birleştirilmesi, yani bir birleştirilmiş kümeye ulaşılması önerilmektedir. Önerilen yöntem iki ayrı senaryo altında sınanmıştır.

Birinci senaryoda, homojen bir veri setinde inceleme yapılmıştır ve bir analizcinin kendisine ulaşan suçlayıcı görüntülerin kaynağını şüphelenilen yani sorgulanan bir kaynak kamera ile, önerilen yöntemi kullanarak ilişkilendirip ilişkilendiremediği incelenmiştir. Bu senaryoda, analizcinin veri setinde bulunan dört kameranın üçünde doğru bir şekilde KKT yapabildiği ve doğru imgeleri bulma olasılığının %100'e ulaştığı görülmüştür.

İkinci senaryoda ise, analizciden daha zor bir sorunu çözmesi beklenmektedir, zira kendisine ulaşan görüntülerin yarısı bilinmeyen bir kaynak cihazdan gelmektedir. Bu şekilde, biri bilinen (şüphelenilen) öteki ise bilinmeyen olmak üzere oniki adet kamera çifti kullanılarak deneyler yapılmıştır. Bu senaryo kapsamında da, önerilen yöntemi kullanan analizcinin doğru kaynak tanıma yapma olasılığının arttığı, buna karşın pek çok kamera çiftinde (oniki çiftin altısında) karar veremediği görülüştür.

Devam eden bulgularda ise, alt küme adetinin tez kapsamında önerilen yöntemin başarımına nasıl etki ettiği incelenmiştir ve Çizelge 4.25 ve 4.26'de bu incelemeye ilişkin elde edilen bulgular verilmiştir. İki çizelgede yer alan bulgulara göre, daha fazla alt küme kullanılması halinde, önerilen yöntem ile KKT yapılabilen durumların senaryolardan bağımsız olarak arttığı, buna karşın yöntem başarımının pek değişmediği gözlemlenmiştir.

4.4 Geometrik Dönüşüme Uğramış Görüntülerde KKT Başarımı ve Bulguların Değerlendirilmesi

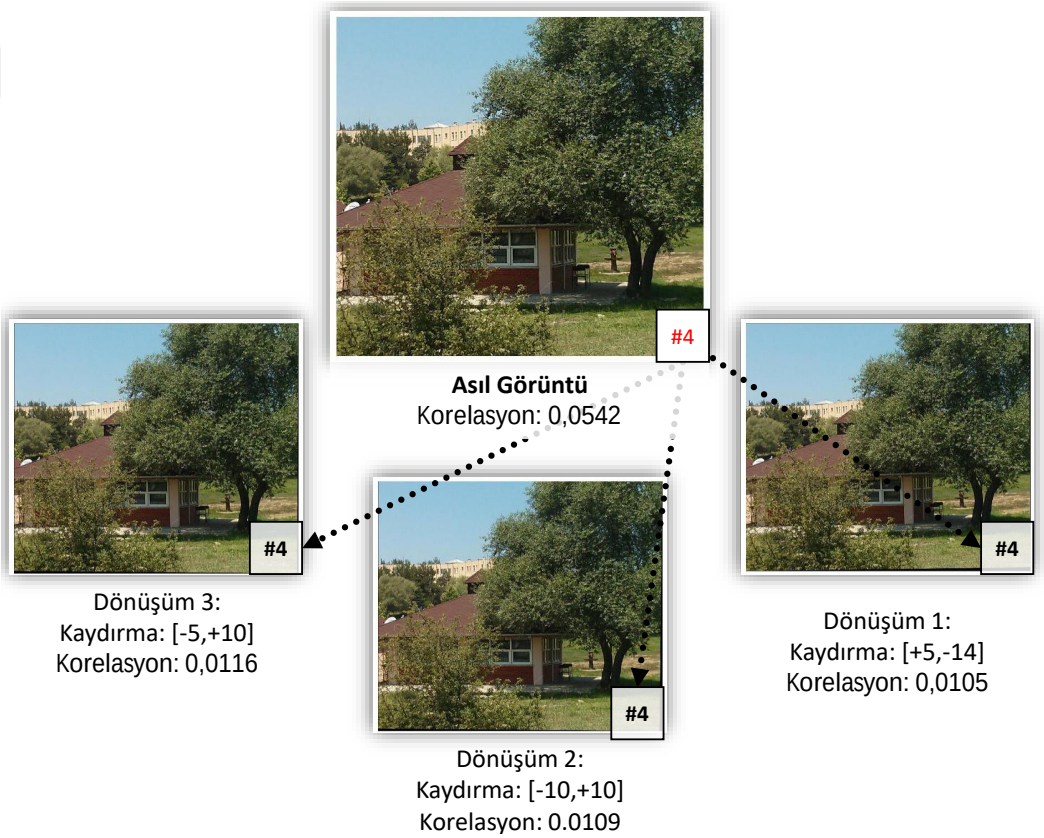
Geometrik dönüşüme uğramış görüntülerde KKT yapılabilmesine için önerilen yönteme ilişkin sonuçlar üç örnek üzerinden incelenmektedir. Bu üç görüntü, görüntülerin sağ alt köşesinde Çizelge 4.27'de gösterilen koordinatlarla projektif dönüşüm uygulanarak elde edilmektedir. Değiştirilen koordinatlar koyu renkli yazılmaktadır.

Örneğin, Görüntü #1 elde edilirken, görüntünün sağ alt köşe koordinatı (1024,1024)'den, (1024+5,1024-15)=(1029,1009)'e uzatılmaktadır. Aynı işlem uygulanarak, iki görüntü daha elde elde edilmektedir. Çizelge 4.27'de bu görüntülere ilişkin durum da gösterilmektedir. KKT ölçütü olarak dikkate alınan Korelasyon değerlerinin ise uygulanan uzatma işleminin boyutuna bağlı olarak düştüğü gözlemlenmektedir ve değişimin kare-

Çizelge 4.27. Görüntülerin başlangıç durumu ve dönüştürülmelerinde kullanılan köşe noktaları.

	Orijinal		Dönüşümde Kullanılan Köşe Noktaları					
Köşe Noktaları	x_0	y_0	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3
#1	0	0	0	0	0	0	0	0
#2	0	1024	0	1024	0	1024	0	1024
#3	1024	0	1024	0	1024	0	1024	0
#4	1024	1024	**1029**	**1009**	**1014**	**1034**	**1019**	**1034**
Top. Değişim $(d_x^2 + d_y^2)$	–		250		200		125	
Maks. Korelasyon	**0,0542**		0,0105		0,0109		0,0116	

sel toplamı $(d_x^2 + d_y^2)$ ile oranlı bir şekilde bu düşüşün gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.15. Görünüye uygulanan dönüşümler.

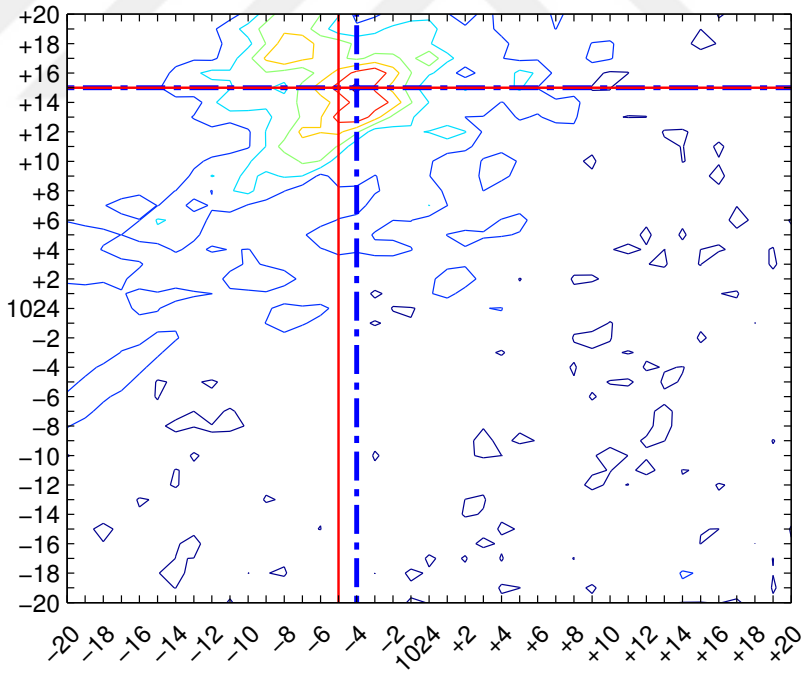
Bu üç adet görüntü versiyonu daha sonrasında kayıt ortamına en yüksek kalite ayarı ile kaydedilmektedir ve bu dönüştürülmüş görüntülerden, uygulanan dönüşüme ilişkin parametreler önerilen yöntem ile (Denklem 3.28) aranmaktadır. Bu işleme ilişkin bulgular bir sonraki başlıkta verilmektedir.

Dönüştürülmüş görüntüler üzerinden önerilen yöntem kapsamında Denklem 3.28 ile

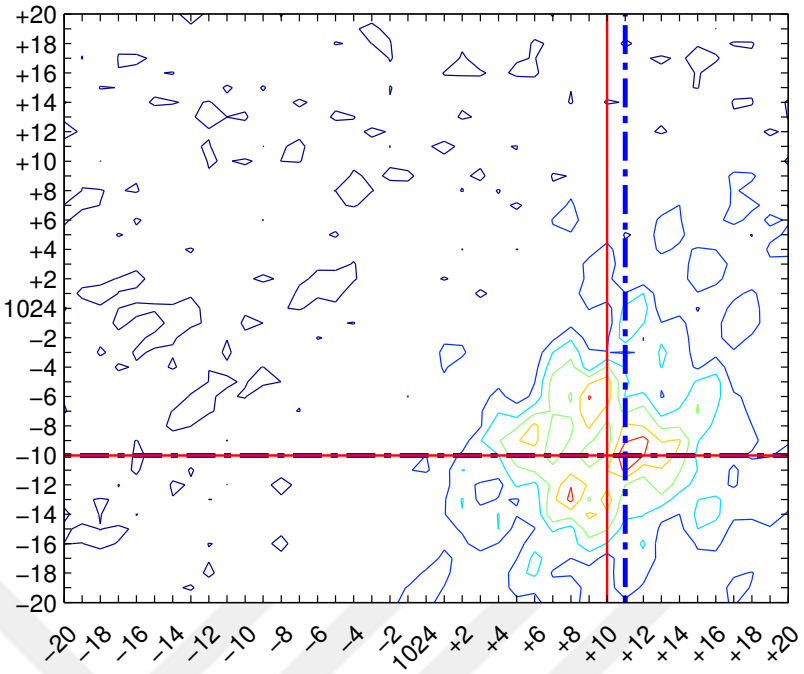
ifade edilen bir ızgara tarama uygulması korelasyon değerleri üzerinden gerçekleştirilmektedir. Dönüştürülmüş görüntünün girdi olarak kullanıldığı bu uygulamada, görüntünün aslına ulaşılması hedeflenmektedir.

Örneğin, Görüntü #1'de uygulanan dönüşüm görüntünün dördüncü köşesini (1024+5, 1024-15)'e taşımakta iken, önerilen yöntem kapsamında, ızgara tarama yapılarak korelasyon tepesinin tespit edildiği koordinatlar (1024-4,1024+15)=(1020,1039) şeklinde oluşmaktadır ve bu durum Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

Diğer dönüştürülmüş görüntlere ilişkin sonuçlar, Şekiller 4.17 - 4.18'de yer almaktadır. Şekillerde, arama işlemine ilişkin elde edilen korelasyon değerleri kontur çizimleri olarak gösterilmektedir. Yine aynı şekiller üzerinde, uygulanan dönüşüme ilişkin köşe parametreleri $x_i^{'}(p), y_i^{'}(p)$ ve kestirilen dönüşüm parametreleri $\hat{x}_i^{'}(p), \hat{y}_i^{'}(p)$ kolay anlaşılabilmesi için sırası düz kırmızı çizgiler ve kesikli mavi çizgiler ile şekiller üzerinde çizilmektedir.



Şekil 4.16. Izgara tarama işlemi ile dönüşüme uğramış görüntü #1 için elde edilen PRNU benzerlik konturunun çizimi. Mavi çizgi ile kestirilen $(\hat{x}_1^{'}, \hat{y}_1^{'})$, kırmızı çizgi ile uygulunan dönüşüme ilişkin gerçek ters dönüşüm parametresi $(x_1^{'}, y_1^{'})$ gösterilmektedir. Şeklin yatay ekseni görüntünün X eksenine, dikey ekseni ise Y eksenine tekabül etmektedir.



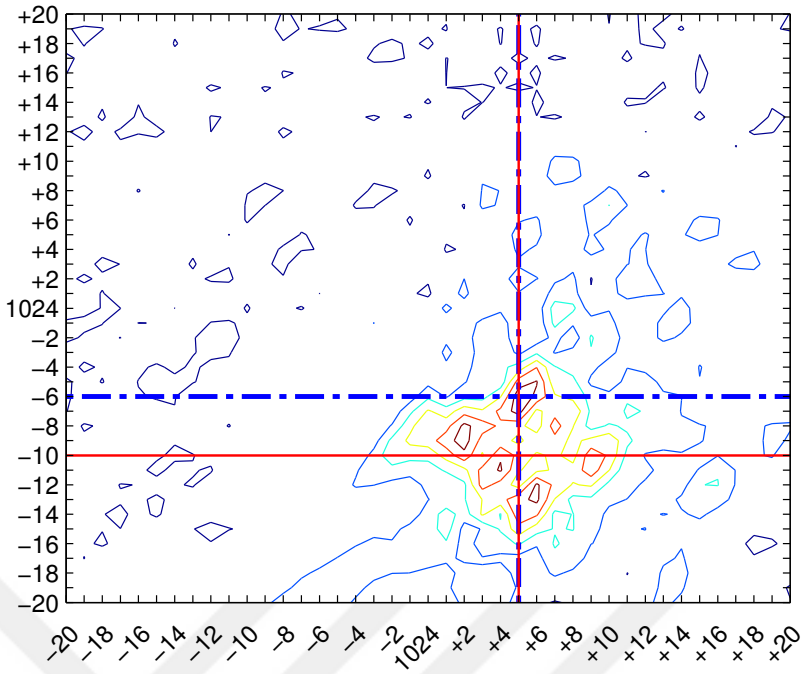
Şekil 4.17. Izgara tarama işlemi ile dönüşüme uğramış görüntü #2 için elde edilen PRNU benzerlik konturunun çizimi. Mavi çizgi ile kestirilen $(\hat{x}_1^{'}, \hat{y}_1^{'})$, kırmızı çizgi ile uygulunan dönüşüme ilişkin gerçek ters dönüşüm parametresi $(x_1^{'}, y_1^{'})$ gösterilmektedir. Şeklin yatay ekseni görüntünün X eksenine, dikey ekseni ise Y eksenine tekabül etmektedir.

İlk dönüşüm sonucunda, görüntüde en-boy ekseninde (x ve y) daralma ve genişleme oluşmaktadır, dolayısı ile ters dönüşümün bunun tersi yönde gerçekleşmesi gerekmektedir. Bir diğer deyişle, uygulanan başlangıç dönüşümü, görüntüyü x ekseninde daraltıyor (sıkıştırıyor) ise, kestirilen ters dönüşüm parametrelerinin, görüntüyü bu eksende genişletmesi (uzatması) beklenmektedir.

Çizelge 4.28. Kestirilen dönüşüm parametreleri ve korelasyon sonuçları.

	Uygulanan Dönüşüm (x_i, y_i)		Kestirilen Ters Dönüşüm $(\hat{x}_i^{'}, \hat{y}_i^{'})$	
	Köşe Koord.	Korelasyon	Köşe Koord.	Korelasyon
Görüntü #1	(1019,1009)	0,0105	(1020,1039)	**0,0417**
Görüntü #2	(1014,1034)	0,0109	(1035,1014)	**0,0409**
Görüntü #3	(1019,1034)	0,0116	(1029,1018)	**0,0384**

Dönüşüm parametreleri kestirildikten sonra, ters dönüşümün uygulaması oldukça kolaylaşmaktadır. Ters dönüşüm ile elde edilen korelasyon değerleri Çizelge 4.28'de gösterilmektedir.



Şekil 4.18. Izgara tarama işlemi ile dönüşüme uğramış görüntü #3 için elde edilen PRNU benzerlik konturunun çizimi. Mavi çizgi ile kestirilen $(\hat{x}_1^{'}, \hat{y}_1^{'})$, kırmızı çizgi ile uygulunan dönüşüme ilişkin gerçek ters dönüşüm parametresi $(x_1^{'}, y_1^{'})$ gösterilmektedir. Şeklin yatay ekseni görüntünün X eksenine, dikey ekseni ise Y eksenine tekabül etmektedir.

Önerilen yöntem ile elde edilen değerler, PRNU tabanlı KKT yapılabilmesine elverecek şekilde görüntülerin PRNU eşleşmelerinin iyileştirildiğini göstermektedir. Buna karşın, ters dönüşüm parametrelerinde bir miktar uzamsal hata bulunmaktadır. Ayrıca korelasyon değerleri de görüntünün aslına kıyasla bir miktar düşüktür. Bu hataların, görüntünün dönüşümü esnasında oluşan bozulmalardan meydana geldiği düşünülmektedir.

5. SONUÇ

Bu doktora tezi kapsamında, adli bilişim alanında kaynak doğrulama ve tanılamada kullanılan yöntemlerden en önde geleni PRNU tabanlı KKT'ye ilişkin yeni yöntemler geliştirilmiş ve bu yöntemlerin başarımı çeşitli veritabanlarında incelenmiştir.

Geliştirilen yöntemlerden ilki PRNU tabanlı KKT'nin çalışmasını önlemeye yöneliktir. KKT'nin önlenmesine yönelik tez kapsamında anlatılan yöntem, kişilerin çektikleri fotoğraflar üzerinden takip edilebilmelerini yüksek başarı ile önleyebilmektedir. Ancak bu yöntemin kullanım alanı sadece kişilerle sınırlı değildir.

Günümüzde kamera ile donatılmış pek çok araç ile, hassas içerikli görüntüler elde edilmekte ve bunlar kimi zaman paylaşılabilmektedir. Bu gibi içerikler üzerinden, hangi aracın, hangi eylem esnasında kullanıldığına ilişkin hassasiyet arz eden bilgilerin, örneğin bir askeri operasyonda kaç adet farklı insansız hava aracının kullanıldığı gibi, hasım güçlerin eline geçmesinin engellenmesi mümkün olabilecektir. Bir diğer örnek ise, istihbari çalışmalarda elde edilen görüntülerin yabancı güçlerin eline geçmesi durumudur. Önerilen önleyici yöntem kullanılmadığında, PRNU tabanlı KKT yüksek bir başarım ile istihbaratı sağlayan kişi ya da kişileri açık edecektir.

Geliştirilen yöntemlerden ikincisi, bir başka önleyici yöntem olarak literatürde ileri sürülen Yama-Eşleştirme yöntemi ile işlenmiş görüntülerde KKT yapılabilmesine yöneliktir.

Yama-Eşleştirme yöntemi oldukça başarılı bir şekilde PRNU tabanlı KKT yapılmasını önleyebilmektedir. Buna karşın, yöntem ile işlenen görüntü parçalarının görüntü içeriğine bağlı olarak rasgele dağılım göstermesi sayesinde bu önleyici yöntem ile işlenmiş görüntülerde dahi KKT yapılabileceği gösterilmiştir.

Bu kapsamda önerilen yöntem ile Yama-Eşleştirme yapılmış görüntülerin tanınma oranı %40-%100 oranında mümkün hale gelmektedir.

Önerilen yöntemin, tez kapsamında incelenmemiş olsa dahi, pek çok görüntü içeriğine

müdahale tabanlı önleyici yöntem karşısında başarılı olacağı görülmektedir. Özellikle, görüntü restorasyonu için kullanılan yamalama yöntemi (ing. inpainting) ile işlenmiş görüntülerde KKT yapılabilmesinin önünün açıldığı değerlendirilmektedir. Bu konudaki araştırmalarımız ve çalışmalarımız devam edecektir.

Bu tez çalışmaları kapsamında geliştirilen diğer yöntem ise, geometrik dönüşüme uğramış görüntülerden KKT yapılabilmesine yöneliktir.

Günümüzde, geometrik olarak dönüştürülmüş görüntüler ile, panaromik görüntülerden, döküman oluşturma uygulamalarına ve videolardaki titreşimlerin engellenmesine değin pek çok farklı şekilde karşılaşılmaktadır. Bu görüntülerde PRNU tabanlı KKT yapılabilmesine yönelik ise literatürde yer alan ilk yöntem, bu tez kapsamında geliştirilmiştir.

Bu görüntülerden KKT yapılabilmesi için, önerilen yöntem kapsamında belirli bir aralık dahilinde ters geometrik dönüşüm uygulanmaktadır. Deney kapsamında belirlenen aralık gereği, 40×40 adet ters dönüşüm yapılarak kaynak kamera PRNU parmak izi ile görüntü arasındaki korelasyonun %400 civarı arttırılması mümkün olmuştur.

Nispeten sınırlı olan bu deneyden elde edilen bulgulardan, terslenebilir operasyonların PRNU ile KKT yapılmasını engelleyemediği sonucuna ulaşılmaktadır. Ancak ters dönüşümün bulunmasının işlemsel maliyetinin kimi durumlarda bu faaliyeti engelleyici olacağı değerlendirilmektedir.

Özet olarak tez çalışması dahilinde literatüre katkılarımız şu şekildedir:

- Görüntüler üzerinde PRNU tabanlı kaynak tanılama ve doğrulamanın önlenmesine yönelik olarak iki adet yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler literatürde APD-1 (ÖY-1) ve APD-2 (ÖY-2) olarak yayınlanmıştır. Yöntemler bilgimiz dahilinde literatürdeki benzerlerine oranla en yüksek başarım gösteren KKT-önleyici yöntemlerdir.

- Yama-eşleştirme algoritması ile işlenmiş görüntülerde KKT yapılabilmesine yönelik **ilk** yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem literatürde yayınlanmıştır.

- Geometrik olarak dönüşüme uğramış görüntülerde tersleme yolu ile KKT yapılabilmesine yönelik **ilk** yöntem ve bulgular elde edilmiştir. Bu yöntem ve bulgular literatürde yayınlanmıştır.

Buna rağmen, adli bilişim alanında, özel olarak da çoğul ortam veri tiplerinin adli bilişim bakımından incelenmesinde literatürde önerilen yöntemlerin genel eksiklikleri vardır. Bunları şu şekilde özetlemekteyiz:

Düzeltilmiş çoklu ortam veri tipleri: Bu tip verilerin üretilmesi esnasında oluşan kalıntılara dayalı adli bilişim algoritmalarının başarımları, büyük çoğunlukla medyada gerçekleştirilen düzeltici işlemlerden dolayı düşmektedir. Video titreşim azaltma, yankı iptali (ing. echo cancellation), optik bozulum düzeltme algoritmaları gibi düzeltici işlemler, yazılımsal ya da donanımsal ekipmanlar yardımı ile gerçekleştirilebilmektedir ve bundan dolayı adli bilişim uygulamasının nazara aldığı kalıntıların yapısını bozmaktadır. Düzeltme işleminin terslenebilmesi ise çoğu zaman tez kapsamında gösterildiği gibi mümkündür, fakat işlem maliyeti caydırıcı derece büyük olabilmektedir.

Veri / bilgi eksikliği: Veri içerisinde bulunan tekrar eden yapıları (örüntüleri) hedef alan adli bilişim yöntemleri, ilgili örüntünün işlem görmemiş bir çoğul ortam verisinde nasıl olduğunu tespit edebilmek için bir miktar "işlenmemiş" veriye ihtiyaç duymaktadır. Bu kadar veriye erişilemediği durumda ilgili yöntemlerin hedeflenen örüntüyü modellemesi mümkün olamamaktadır. Tez kapsamında önerilen pek çok yöntemde, işlenmemiş veriye erişilebilmesi mümkün olarak varsayılmıştır. Gerçekten de, içerik paylaşımının cesaretlendirildiği günümüzde bu mümkündür, fakat verinin sürekli hazır ve güncel tutulması, yani paylaşılan içeriklerin sürekli kaydedilmesi ilgili otoritelerin büyük bir yatırım yapmasını ve sürdürmesini gerektirmektedir.

Değişken içerik: Durağan bir karaktere sahip olmayan içeriklerden örüntü elde edilmesi bir nevi veri eksikliğine sebep olmaktadır. Örneğin hızlı hareket eden hareketli görüntüler ve yüksek değişkenliğe sahip ses ve görüntü içeriğinden hedeflenen yapının modellenmesi mümkün olamamaktadır.

Sınırlı fiziksel özellikler barındıran çoklu ortam veri tipleri: Fiziksel bütünlüğü

hedef alan adli bilişim yöntemleri, gölge, açılar ve boyut farklılıkları gibi özelliklerden yararlanmaktadır. Bu gibi özelliklerin biri veya birkaçının eksik olması durumunda fiziksel bütünlük tabanlı adli bilişim yöntemleriyle çalışmak mümkün olmamaktadır.

Uç noktalarda değer alan ışık ve ses şiddeti: Aşırı doygun ve aşırı düşük şiddette içerik ihtiya eden çoklu ortam verisi alıcı sistemin karakteristiğinin modellenmesinde kullanılabilir bilgiyi azaltmaktadır.

Sıkıştırma: Adli bilişim uygulamalarında faydalanılan veriler sıkıştırma sonrasında zayıoflamakta ya da kaybolmaktadır. Örneğin JPEG sıkıştırma görüntüye ilişkin düşük seviye özellikleri bozmaktadır, video sıkıştırma ara-kodlanmış çerçevelerin sayısını azaltmaktadır. Benzer şekilde bazı ses sıkıştırma algoritmaları, ses kaydında bulunan sessiz bölmeleri kaldırmakta ve bu bölgeden cihaza ilişkin karakteristiği çıkartan adli bilişim yöntemlerinin çalışmasını imkansız hale getirmektedir.

Medyada yapılan değişiklikler: Günümüzde popüler uygulamalarca sıklıkla kullanılan filtreler, dönüşümler ve renk değişiklikleri çoğul ortam verisini orijinal halinden uzaklaştırma ve adli bilişim açısından kıymetli olan cihaza ilişkin bilgilerin zayıflamasına sebep olmaktadır. Literatürde bu gibi efektlerin hangi yazılımla yapıldığına ilişkin yazılımsal karakteristik modellemelerine yönelik bazı çalışmalar da bulunmasına karşın, cihazlarda yüklü yazılımlar sıklıkla güncellenebilmektedir ve bu bilgi üzerinden kararlı bir karar verilmesi pek mümkün olamamaktadır.

Yukarıda anılan genel eksiklere ilave olarak, PRNU tabanlı yöntemlerde bulunan gürültü ile parmak izi arasındaki "eşleştirme" uygulamasının gerçekleştirilebilmesi için aşağıda listenen ve sıklıkla karşılaşılan zorlaştırıcı işlemlerin her birinin nasıl terslenebileceğine ilişkin yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Çözünürlüğü değiştirilen veri tipleri: Veri çözünürlüğü başta çevrim-içi hizmetlere veri aktarımının hızlandırılması ve kayıt ortamında kapladığı alanın küçültülmesi gibi sebeplerle değiştirilebilmektedir. Kimi cihazlarda ise kaynak veri çözünürlüğü, yayınlanacağı ortamın gerektirdiğinden küçük olduğunda büyütme işlemi uygulanabilmektedir. Bu uygulamalar esnasında, başta enterpolasyon olmak üzere kimi temel seviye işlemler

gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde işlenmiş verilerle KKT yapılabilmesi için kullanılan yeniden boyutlandırma faktörünün ve kullanılan tekniğin bilinmesi gerekmektedir.

Yüksek dinamik aralıklı veri tipleri: Sahnelerdeki parlaklık aralığının genişletilmesinde ve bu sayede daha detaylı görüntüler elde edilmesinde kullanılan HDR (ing. High Dynamic Range) yönteminde birden çok görüntüden faydalanılmaktadır. Bu görüntüler elde edilirken, aynı kamera ile düşük, orta ve yüksek pozlama seviyelerinde ayrı birer çekim yapılır ve bu çekimler birleştirilir. Buna karşın, çekimler için geçen süre esnasında el hareketlerinden ve titreşimlerden dolayı kaymalar meydana gelir. Cihaz işlemcisi ise, farklı görüntüleri bir biri ile üstüste getirerek HDR görüntüyü oluşturur. Bu üstüste getirme esnasında ise görüntülerin kırpılması, yeniden boyutlandırılması ve açısal düzeltmeler gerçekleştirilir. Sonuçta oluşan görüntü, farklı şekillerde işlenmiş bir çok görüntüden elde edilmektedir ve bu durum PRNU ve benzeri adli bilişim yöntemleri açısından görüntünün analizini oldukça karmaşık bir hale getirmektedir.

Çok alıcılı cihazlar ile elde edilen veri tipleri: Günümüzde özellikle cep telefonu üreticileri müşterilerin beklentilerini karşılayabilmek için çok sayıda kamera modulü (sensör ve optik) ihtiva eden cihazlar tasarlamaktadır. Bu cihazlarda yer alan kamera modüllerinin farklı çözünürlükte olmaları ve farklı optik yapılara sahip olması ise olağandır. Kimi cihazlarda her bir modül kendi alanına yönelik (örneğin uzak mesafe modülü) sahnelerde devreye girerken, bazıları ise birden çok kameradan elde edilen görüntüyü, yukarıda anlatılan HDR uygulamasındaki gibi birleştirerek kullanmaktadır (örn. Google'ın Pixel model cep telefonları). Kamera modüllerinin arasındaki uzaklık nedeniyle ise her bir görüntü aynı anda çekilebilse bile görüntülenen sahneler arasında kaymalar bulunmaktadır. Birleştirme esnasında bu sahnelerin üstüste bindirilmesi yine gerekmektedir. Bu durumda adli bilişim uzmanının ilgili cihazın üzerindeki her bir kamera sensörünün PRNU parmak izinin modellenmesi gerekecektir. Fakat her cihaz yalnızca tek bir kamera modülü ile görüntü elde edilmesine izin vermemekte, sahneye göre eğitilen yapay zeka tarafından kullanıcı müdahelesi olmadan otomatik modül seçimi yapılabilmektedir. Bu gibi cihazlarda genellikle görüntülenen nesnenin kameraya olan uzaklığını ölçmekten sorumlu tek bir sensörü bulunmaktadır ve yapay zeka algoritması

bu modülden gelen verilere bağlı olarak kamera modülünü seçimi değiştirmektedir. Bu gibi cihazlarla adli bilişim uygulamalarının nasıl bir başarım göstereceği ve sürecin bir çeşit kara-kutu olması ve üreticiden üreticiye göre değişmesi nedeniyle nasıl çözüleceği literatürde henüz incelenmemiş ve gelecekte çalışmayı planladığımız oldukça ilginç bir problemdir. Akla gelen birincil uygulama, cihazların eğer açık kaynak yazılımları mevcut ise, bu kodlar üzerinden kamera ile alakalı yazılımın incelenmesidir. Diğer uygulama ise mevcut ise, az sayıdaki kamera modül üreticilerinin sunduğu sürücülerin incelenmesidir.

Tez kapsamında yukarıda anılan problemlerin bir kısmına dair yeni adli bilişim yöntemleri geliştirilmiş ve bu yöntemler kullanılarak gerçekçi senaryolar üzerinden elde edilen bulgular açıklanmıştır. Ayrıca, ilgili literatürde değinilmemiş ve zorlayıcı konular da tartışılmıştır. Açıklanan yöntemlerin ve değinilen zayıflıkların, ilgili alanın araştırmacılarına çoklu ortam içeriklerinin (görüntü veya video, ses gibi diğer ortam verileri) gösterdikleri olayla ilgili hakikati gösterdiğine ilişkin toplum nezdinde kaybolmakta olan güveni yeniden tesis etmekte fayda sağlayacağını ümit etmekteyiz.

KAYNAKLAR

Bayram, S., Sencar, H. T., ve Memon, N. (2012). Efficient sensor fingerprint matching through fingerprint binarization. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, *7*(4), 1404–1413.

Böhme, R., ve Kirchner, M. (2013). Counter-forensics: Attacking image forensics. Içinde H. T. Sencar, ve N. Memon (Ed.) *Digital Image Forensics: There is More to a Picture than Meets the Eye*, Cilt 9781461407, Bölüm 5, (s. 327–366). New York, NY: Springer New York.

Chen, M., Fridrich, J., Goljan, M., ve Lukáš, J. (2007). Source digital camcorder identification using sensor photo response non-uniformity. Içinde *Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents IX*, Cilt 6505, (s. 65051G).

Chen, M., Fridrich, J., Goljan, M., ve Lukáš, J. (2008). Determining image origin and integrity using sensor noise. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, *3*(1), 74–90.

Chierchia, G., Parrilli, S., Poggi, G., Verdoliva, L., ve Sansone, C. (2011). PRNU-based detection of small-size image forgeries. Içinde *17th DSP 2011 International Conference on Digital Signal Processing, Proceedings*, (s. 1–6). IEEE.

Chu, W., Song, J., Vorburger, T., Yen, J., Ballou, S., ve Bachrach, B. (2010). Pilot study of automated bullet signature identification based on topography measurements and correlations. *Journal of Forensic Sciences*, *55*(2), 341–347.

Currie, M. J., Berry, D. S., Jenness, T., Gibb, A. G., Bell, G. S., ve Draper, P. W. (2014). Starlink Software in 2013. Içinde N. Manset, ve P. Forshay (Ed.) *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIII*, Cilt 485 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, (s. 391).

Debiasi, L., Scherhag, U., Rathgeb, C., Uhl, A., ve Busch, C. (2018). Prnu-based detection of morphed face images. Içinde *2018 International Workshop on Biometrics and Forensics (IWBF)*, (s. 1–7).

Dirik, A. (2011). *New Techniques in Multimedia Forensics*. LAP Lambert Academic Publishing, Omniscriptum Gmbh & Co. Kg.

Dirik, A. E., ve Karaküçük, A. (2014). Forensic use of photo response non-uniformity of imaging sensors and a counter method. *Optics Express*, *22*(1), 470.

Dirik, A. E., ve Karaküçük, A. (2019). Anonymization system and method for digital images. U.S. Patent 10,297,011.

Dirik, A. E., Sencar, H. T., ve Memon, N. (2007). Source camera identification based on sensor dust characteristics. *Proceedings - SAFE 2007: Workshop on Signal Processing Applications for Public Security and Forensics*.

Dirik, A. E., Sencar, H. T., ve Memon, N. (2014). Analysis of seam-carving-based anonymization of images against PRNU noise pattern-based source attribution. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, *9*(12), 2277–2290.

Entrieri, J., ve Kirchner, M. (2016). Patch-Based desynchronization of digital camera sensor fingerprints. Içinde *IS and T International Symposium on Electronic Imaging Science and Technology*, 8, (s. 1–9).

Geradts, Z. J., Bijhold, J., Kieft, M., Kurosawa, K., Kuroki, K., ve Saitoh, N. (2001). Methods for identification of images acquired with digital cameras. Içinde S. K. Bramble, E. M. Carapezza, L. I. Rudin, L. I. Rudin, ve S. K. Bramble (Ed.) *Enabling Technologies for Law Enforcement and Security*, Cilt 4232, (s. 505 – 512). International Society for Optics and Photonics, SPIE.

Gloe, T. (2012). Feature-based forensic camera model identification. Içinde Y. Q. Shi, ve S. Katzenbeisser (Ed.) *Transactions on Data Hiding and Multimedia Security VIII*, (s. 42–62). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Gloe, T., Kirchner, M., Winkler, A., ve Böhme, R. (2007). Can we trust digital image forensics? Içinde *Proceedings of the ACM International Multimedia Conference and Exhibition*, (s. 78–86). New York, New York, USA: ACM Press.

Goljan, M. (2009). Digital camera identification from images - Estimating false acceptance probability. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *5450 LNCS*, 454–468.

Goljan, M., ve Fridrich, J. (2008). Camera identification from cropped and scaled images. Içinde E. J. Delp III, P. W. Wong, J. Dittmann, ve N. D. Memon (Ed.) *Security, Forensics, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents X*, Cilt 6819, (s. 68190E).

Goljan, M., ve Fridrich, J. (2013). Sensor fingerprint digests for fast camera identification from geometrically distorted images. Içinde A. M. Alattar, N. D. Memon, ve C. D. Heitzenrater (Ed.) *Media Watermarking, Security, and Forensics 2013*, Cilt 8665, (s. 86650B).

Goljan, M., Fridrich, J., ve Chen, M. (2010a). Sensor noise camera identification: countering counter-forensics. Içinde N. D. Memon, J. Dittmann, A. M. Alattar, ve E. J. Delp III (Ed.) *Media Forensics and Security II*, Cilt 7541, (s. 75410S).

Goljan, M., Fridrich, J., ve Chen, M. (2011). Defending against fingerprint-copy attack in sensor-based camera identification. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, *6*(1), 227–236.

Goljan, M., Fridrich, J., ve Filler, T. (2009). Large scale test of sensor fingerprint camera identification. Içinde E. J. Delp III, J. Dittmann, N. D. Memon, ve P. W. Wong (Ed.) *Media Forensics and Security*, Cilt 7254, (s. 72540I). International Society for Optics and Photonics, SPIE.

Goljan, M., Fridrich, J., ve Filler, T. (2010b). Managing a large database of camera fingerprints. Içinde N. D. Memon, J. Dittmann, A. M. Alattar, ve E. J. Delp III (Ed.) *Media Forensics and Security II*, Cilt 7541, (s. 754108).

Holst, G. C. (1998). *CCD arrays, cameras, and displays*. Winter Park; Bellingham: JDC publ. ; SPIE Optical engineering Press.

Jager, C., De Jager, C., ve Nieuwenhuijzen, H. (1975). Image processing techniques in astronomy: Proceedings of a conference held in utrecht on march 25-27, 1975. Springer Netherlands.

Janesick, J. R. (2001). *Scientific Charge-Coupled Devices*. Bellingham: SPIE Press.

Karaküçük, A., ve Dirik, A. E. (2015). Adaptive photo-response non-uniformity noise removal against image source attribution. *Digital Investigation*, *12*, 66–76.

Karaküçük, A., Dirik, A. E., Sencar, H. T., ve Memon, N. D. (2015). Recent advances in counter PRNU based source attribution and beyond. Içinde A. M. Alattar, N. D. Memon, ve C. D. Heitzenrater (Ed.) *Media Watermarking, Security, and Forensics 2015*, Cilt 9409, (s. 94090N).

Karaküçük, A., ve Dirik, A. E. (2019). Prnu based source camera attribution for image sets anonymized with patch-match algorithm. *Digital Investigation*, *30*, 43 – 51.

Korus, P., ve Huang, J. (2016). Evaluation of random field models in multi-modal unsupervised tampering localization. Içinde *2016 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS)*, (s. 1–6). IEEE.

Korus, P., ve Huang, J. (2017). Multi-Scale Analysis Strategies in PRNU-Based Tampering Localization. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, *12*(4), 809–824.

Kurosawa, K., Kuroki, K., ve Saitoh, N. (1999). CCD fingerprint method-identification of a video camera from videotaped images. Içinde *Proceedings 1999 International Conference on Image Processing (Cat. 99CH36348)*, Cilt 3, (s. 537–540). IEEE.

Li, C.-T., Chang, C.-Y., ve Li, Y. (2010). On the repudiability of device identification and image integrity verification using sensor pattern noise. Içinde D. Weerasinghe (Ed.) *Information Security and Digital Forensics*, (s. 19–25). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Lim, J. S. (1990). *Two-dimensional signal and image processing*. Englewood Cliffs; NJ: Prentice Hall.

Lukáš, J., Fridrich, J., ve Goljan, M. (2005). Determining digital image origin using sensor imperfections. Içinde A. Said, ve J. G. Apostolopoulos (Ed.) *Image and Video Communications and Processing 2005*, Cilt 5685, (s. 249). SPIE.

Lukáš, J., Fridrich, J., ve Goljan, M. (2006). Digital camera identification from sensor pattern noise. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, *1*(2), 205–214.

Mihcak, M. K., Kozintsev, I., ve Ramchandran, K. (1999). Spatially adaptive statistical modeling of wavelet image coefficients and its application to denoising. *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, *6*, 3253–3256.

Olivier, M. (2008). Using sensor dirt for toolmark analysis of digital photographs. Içinde I. Ray, ve S. Shenoi (Ed.) *Advances in Digital Forensics IV*, (s. 193–206). Boston, MA: Springer US.

Rosenfeld, K., ve Sencar, H. T. (2009). A study of the robustness of PRNU-based camera identification. Içinde E. J. Delp III, J. Dittmann, N. D. Memon, ve P. W. Wong (Ed.) *Media Forensics and Security*, Cilt 7254, (s. 72540M).

Sencar, H. T., ve Memon, N. (Ed.) (2013). *Digital image forensics: There is more to a picture than meets the eye*, Cilt 9781461407. New York, NY: Springer.

Souza, A., Carlson, I., Ramos, H. S., Loureiro, A. A., ve Oliveira, L. B. (2020). Internet of things device authentication via electromagnetic fingerprints. *Engineering Reports*, (s. e12226).

Steinebach, M., El Ouariachi, M., Liu, H., ve Katzenbeisser, S. (2010). On the reliability of cell phone camera fingerprint recognition. Içinde S. Goel (Ed.) *Digital Forensics and Cyber Crime*, (s. 69–76). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Thompson, R. M. (1999). Automated firearms evidence comparison using the Integrated Ballistic Identification System (IBIS). Içinde K. Higgins (Ed.) *Investigation and Forensic Science Technologies*, Cilt 3576, (s. 94 – 103). International Society for Optics and Photonics, SPIE.

Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., ve Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, *13*(4), 600–612.