

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖNGÖRÜ HATALARINA DAYALI TERSİNİR
GÖRÜNTÜ DAMGALAMA YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre ALTINKAYA

Enstitü Anabilim Dalı : **ELEKTRİK - ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Enstitü Bilim Dalı : **ELEKTRİK**

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Burhan BARAKLI**

Mart 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖNGÖRÜ HATALARINA DAYALI TERSİNİR
GÖRÜNTÜ DAMGALAMA YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre ALTINKAYA

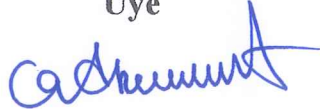
Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK - ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 19.03.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Aşkın DEMİRKOL
Jüri Başkanı



Yrd. Doç. Dr.
Orhan AKBULUT
Üye



Yrd. Doç. Dr.
Burhan BARAKLI
Üye



BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Emre ALTINKAYA
19.03.2018

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, maddi ve manevi her zaman destekçim olan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam; Yrd. Doç. Dr. Burhan BARAKLI'ya teőekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi destekleriyle her zaman arkamda duran, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim annem Saliha ALTINKAYA ve babam İsmail ALTINKAYA'ya, her zaman yanımda olan ve beni motive eden kardeşim Hale ALTINKAYA ve tüm dostlarıma şükranlarımı sunarım. Son olarak Elif ZOROęLU'na çalışmamdaki desteklerinin yanı sıra, bütün güzelliğiyle hayatımda olduğu ve en umutsuz anlarımda dahi bana inandığı için sonsuz teőekkürler.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA	6
2.1. Giriş.....	6
2.2. TD'nin Temel Fikri	7
2.3. Tersinir Görüntü Damgalama Algoritmaları.....	8
2.3.1. Histogram değiştirme	8
2.3.2. Öngörü hatasının genişletilmesi	16
BÖLÜM 3.	
ÖNGÖRÜ HATALARININ UYARLANIR GENİŞLETİLMESİNE DAYALI TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA VE PİKSEL SEÇME	23
3.1. Giriş.....	23
3.2. Altyapı.....	23
3.2.1. Öngörünün oluşturulması.....	23
3.2.2. Uyarlanabilir damgalama	24

3.2.3. Piksel seçme	26
3.2.4. Kapasite parametresi belirleme	28
3.2.5. Optimal uyarlanır ekleme eşik değerinin belirlenmesi	30
3.2.6. Damga ekleme	31
3.2.7. Ek bilginin hazırlanması.....	37
3.2.8. Damga çıkartımı.....	37

BÖLÜM 4.

ARADEĞERLEME HATASINA DAYALI TERSİNİR GÖRÜNTÜ

DAMGALAMA	43
4.1. Giriş	43
4.2. Altyapı	43
4.2.1. Katkı interpolasyonu – hata genişlemesi.....	43
4.2.2. İnterpolasyon hatası.....	47

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	63
EKLER	67
ÖZGEÇMİŞ	72

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

BPP	: Piksel başına düşen bit miktarı
CPU	: Central Processing Unit
FG	: Fark genişletme
HD	: Histogram değiştirme
ÖHG	: Öngörü hatasının genişletilmesi
PSNR	: Tepe işaret gürültü oranı
SD	: Sayısal damgalama
TD	: Tersinir damgalama
TGD	: Tersinir görüntü damgalama
hist(I)	: I görüntüsünün histogramı
b	: Bit
h	: Fark (hata) değeri
h^d	: Damgalı fark değeri
\bar{h}	: Genişletilmiş interpolasyon hatası
I	: Orijinal görüntü
I^d	: Damgalı görüntü
\bar{I}	: Orijinal görüntünün öngörüsü
J	: Yardımcı görüntü
i	: Piksel indisi
j	: Piksel indisi
J_f	: Düzgün bölgedeki pikseller kümesi
J_r	: Düzgün olmayan bölgedeki pikseller kümesi
$lena$: Lena orijinal görüntüsü
$lena^d$: Lena damgalı görüntüsü
$G_f(t)$: t parametresine göre düzgün bölgede genişleyebilen pikseller kümesi

$G_r(t)$: t parametresine göre düzgün olmayan bölgede genişleyebilen Pikseller kümesi
$O_f(t)$: t parametresine göre düzgün bölgede ötelenebilen pikseller kümesi
$O_r(t)$: t parametresine göre düzgün olmayan bölgede ötelenebilen pikseller
P	: Pikseller arası fark değeri
RAM	: Random Access Memory
$T(t)$: t parametresine göre taşma olan pikseller kümesi
FV	: İleri varyans
BV	: Geri varyans
G	: Boşluk
T_{kp}	: Kapasite parametresi
t	: Kapasite parametresi
N_g	: Görüntüye eklenecek damga bitlerinin miktarı
N_{eb}	: Ek bilgi bitlerinin miktarı
M ve N	: Görüntü boyutu
S_{EDB}	: En düşük anlamlı bitlerin saklandığı dizi
x	: Piksel değeri
x^d	: Damgalı x pikselinin değeri
x_h	: Yüksek çözünürlüklü görüntü
x_l	: Düşük çözünürlüklü görüntü
w	: Ağırlık değer
σ	: Varyans değer
Δ_{tae}	: Uyarlamalı damgalamaya ait eşik değeri
Δ_{tps}	: Piksel seçmede kullanılan eşik değeri

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Tersinir damga ekleme algoritmasının genel gösterimi	7
Şekil 2.2. Tersinir damga çıkarma algoritmasının genel gösterimi ve orijinal Görüntünün geri elde edilmesi	7
Şekil 2.3. Lena görüntüsüne ait histogram.	9
Şekil 2.4. HD'ye karşılık gelen blok diyagram (a) damga ekleme (b) damga çıkartımı	9
Şekil 2.5. Örnek görüntü ve histogramı.....	10
Şekil 2.6. Örnek görüntü ve histogramında tepe noktası.....	11
Şekil 2.7. Örnek görüntü ve kaydırılmış histogram	12
Şekil 2.8. Örnek görüntü, kaydırılmış histogram ve eklenecek damga.....	13
Şekil 2.9. Örnek görüntünün damgalanmış hali ve histogramı	14
Şekil 2.10. Maskelenmiş görüntü ve damga çıkarmak için uygulanacak işlemler	15
Şekil 2.11. Maskelenmiş görüntü ve orijinal görüntüye geri dönmek için uygulanacak işlemler.....	15
Şekil 2.12. Maskelenmiş görüntü ve orijinal görüntüye geri dönmek için görüntüye işlemin uygulanmış hali	16
Şekil 2.13. ÖHG histogramı ve bölgelere ayrılması (hesaplamalar lena görüntüsü için yapılmıştır)	17
Şekil 2.14. $t=1$ için görüntünün öngörü hata histogramı	18
Şekil 2.15. $t=1$ için ötelenmiş öngörü hata histogramı	19
Şekil 2.16. $t=1$ için damgalanmış öngörü hata histogramı	20
Şekil 2.17. (a) $t=3$ için görüntünün öngörü hata histogramı (b) Ötelenmiş öngörü hata histogramı	21
Şekil 3.1. Bir pikselin öngörüsünün hesaplanmasında kullanılan pikseller	24
Şekil 3.2. Merkezi (i , j) olan pikselin komşulukları	27
Şekil 3.3. ÖHG yöntemi ile damga ekleme algoritması	28

Şekil 3.4.	$X_{i,j}$ merkezi pikseline ait FV değerini ve öngörü değerini bulurken kullanılan komşuluk ilişkileri.....	31
Şekil 3.5.	Uyarlanır damgalama ve piksel seçimi blok diagramı.....	41
Şekil 3.6.	Damga çıkartma blok diagramı.....	42
Şekil 4.1.	Etrafı yarı kapalı geçici pikselin ve tam kapalı pikselin yorumlanması	46
Şekil 4.2.	(a) Orijinal görüntü, (b),(c) Yüksek çözünürlüklü x_h görüntüsünden, düşük çözünürlüklü x_l görüntüsünü oluşturma. (d) Yüksek çözünürlüklü kalan örneklerin interpolasyonu. (e) Örnek Piksellerin interpolasyonu	48
Şekil 4.3.	Orijinal görüntü ile tahmini görüntü arasındaki fark ile aradeğerleme hatasını elde etme	49
Şekil 4.4.	Ek bilgilerin en düşük anlamlı bitlerle değiştirilmesi	50
Şekil 4.5.	Aradeğerlemeye dayalı TD blok diagram	52
Şekil 5.1.	a) Lena b) Baboon c) Plane d) Sailboat, görüntüleri.....	54
Şekil 5.2.	Mevcut ve önerilen yöntemlerin Lena görüntüsü için performansı ...	58
Şekil 5.3.	Mevcut ve önerilen yöntemlerin Baboon görüntüsü için performansı	59
Şekil 5.4.	Mevcut ve önerilen yöntemlerin Plane görüntüsü için performansı ..	59
Şekil 5.5.	Mevcut ve önerilen yöntemlerin Sailboat görüntüsü için performansı	60
Şekil 5.6.	Damgalı görüntüler	62

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. İkinci görüntü öngörü hatası histogramı için damgalanacak hata ve damga sayıları	22
Tablo 3.1. Ek bilgileri saklayabilmek için gerekli bit sayısı	37
Tablo 5.1. Lena ile Plane görüntülerinin klasik ve adaptif yöntemlere göre Bpp ve Psnr kazanç değerleri.....	56
Tablo 5.2. Lena ile Plane görüntülerinin piksel seçme tekniğine göre öteleme sayıları ve Psnr kazanç değerleri	57

ÖZET

Anahtar kelimeler: Tersinir damgalama, uyarlanır tersinir görüntü damgalama, piksel seçimi, öngörü hatasının genişletilmesi, aradeğerleme hatasının genişletilmesi.

Bu tezde, sayısal bir görüntüye uygulanan farklı iki tersinir görüntü damgalama algoritması kıyaslanmıştır. İlk algoritma, öngörü hatalarının genişletilmesine dayalı uyarlanır bir yöntemdir. Bu yöntem ile mevcut tersinir görüntü damgalama yöntemlerindeki gibi görüntüdeki tüm piksellere aynı damgalama algoritması uygulamak yerine öngörü hatalarının aldığı değerlere göre pikseller farklı iki şekilde damgalanmaktadır. Bu amaçla, görüntü pikselleri düzgün ve düzgün olmayan şekilde iki bloğa ayrılmıştır. Düzgün blokların belirli piksellerine 2-bit damgalama, düzgün olmayan blokların belirli piksellerine ise 1-bit damgalama uygulanarak damgalama kapasitesi artırılmıştır. Ayrıca, yüksek bozunuma sebep olan pikseller belirlenip bu pikseller damgalamada kullanılmayarak damgalama sonucu orijinal görüntüde oluşan bozunum azaltılmıştır. İkinci algoritma, aradeğerleme hatalarının genişletilmesine dayalıdır. Yöntemde, aradeğerleme hatasından faydalanılmaktadır. Kıyaslanan iki yöntem ve literatürdeki mevcut yöntemler bilgisayar benzetimi ile karşılaştırılıp üstün ve zayıf olduğu yönler belirlenmiştir.

COMPARISON OF REVERSIBLE IMAGE WATERMARKING METHODS BASED ON PREDICTION-ERRORS

SUMMARY

Keywords: Reversible watermarking, adaptive reversible image watermarking, pixel selection, expansion of prediction error, expansion of interpolation error.

In this thesis, two reversible image watermarking algorithms applied to a digital image are compared. The first algorithm is an adaptive method based on the extension of prediction errors. With this method, instead of applying the same watermarking algorithm to all pixels in the image as in the current reversible image watermarking methods, the pixel is embedded in two different ways according to the values received by the prediction errors. For this purpose, the image pixels are divided into two parts, such as “flat regions” and “rough regions”. Watermarking capacity is increased by applying 2-bit watermarking to specific pixels of flat blocks and 1-bit watermarking to specific pixels of rough blocks. In addition, distorting pixels are identified and these pixels are not used in the watermarking, resulting in reduced distortion occurring in the original image resulting from the watermarking. The second algorithm is based on the expansion of interpolation errors. In the method, the amount of additional information needed to extract the watermarked value and restore the original image are very small. The two comparative methods and the existing methods in the literature are compared with computer simulations and found to be superior and weak.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanların yaşama şekilleri ve davranış biçimleri hızla değişmektedir. Günümüzde bu değişimin en önemli nedenlerinden bir tanesi, teknolojideki gelişmelerdir. Teknolojik gelişmeler ile birlikte yaşam gereksinimleri de değişmektedir. Dolayısıyla insan ihtiyaçları ve teknoloji arasında çok sıkı bir bağ bulunmaktadır. Bu iki olgu arasındaki etkileşimin bir kısır döngü şeklinde olduğunu da söyleyebiliriz.

20. yüzyılın başlarına kadar insan yaşantısının bazı alanlarında zorluklar bulunmaktaydı. Bu zorlukların bir tanesi de iletişimdi. İnsanlar iletişim için birçok yöntem denemişlerdir. Kuşlar vasıtasıyla haberleşilmiş, ateş ve duman sayesinde bilgilendirmeler yapılmıştır. Kısaca değişik doğa olguları ile haberleşmeler sağlanmıştır. Ancak bu haberleşme şekilleri hem efektif olmamış hem de zamandan kayıplar oluşmuştur.

Gelişen teknoloji ile birlikte hem zamandan kazanmaya hem de daha kaliteli hizmet alınmaya başlanmıştır. Eğitim, ulaşım, iletişim, sanayi, tıp gibi insan için gerekli temel olgulara erişim kolaylaşmıştır. Bu hizmetlerin doğru bir şekilde kullanılması ile yaşam kalitemiz her geçen gün artmaya devam etmektedir.

Teknolojinin günlük hayatımızdaki yeri ve önemi giderek artmaktadır. Bilgisayar ve multimedya araçlarının gelişmesine paralel olarak kullanımı artan internet, yaşantımızın önemli bir parçası haline gelmiştir. Gün geçtikçe her teknolojinin içinde yer almaya başlayan internet, çok erken yaşlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bugün birçok kişinin kullandığı bilgisayar ve benzeri araçlar internet bağlantısı sayesinde, çoğunlukla iletişim, oyun, paylaşım ve sohbet gibi kişisel işler için kullanılmaktadır. Ancak bütün bunların yanında iş dünyası, askeri ve tıbbi sektörlerde çalışma yapan kişi veya kurumlar ve akademik çalışmalar yapanlar için internetin kullanımı daha

büyük önem taşımaktadır. Özellikle araştırma ve geliştirme yapmak istiyorsanız ve bu bağlamda bilgileri toplayıp, analiz ederek sonuçlarınızı hızlı elde etmek için kısıtlı sürede etkili bir iş yapabilmenin en iyi yollarından biri internet kullanmaktır. İşte bu noktada internet kullanarak erişim sağladığımız sitelerin ve bilgilerin ne kadar güvenilir ve doğru olduğu bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

İnternetin günümüzde büyük önem kazanmasındaki en önemli neden, geniş hacimli bilgi içermesidir. Birçok konuda bilgiye ulaşmanın mümkün olduğu internet ortamı hızla büyümeye de devam etmektedir. Bu büyüme ile birlikte yeni güvenlik zafiyet ve problemler de ortaya çıkmaktadır.

İnternet aracılığıyla elde ettiğimiz bilgilerin doğrulanması ve aslına uygun olup olmaması analiz edilebilmektedir. Fakat bu süreçte elektronik ortamdaki bilgilerin aradan geçen zaman içinde güncellenmesi ya da iletim anında yanlışlıkla veya kötü niyetle kolayca değiştirilebilmesi, veri bütünlüğü ve veri güvenliği ile ilgili sorunları beraberinde getirmektedir. Önemli diğer bir problem ise internetten elde ettiğimiz bilgilerin veri bütünlüğü ve veri güvenliğini tehdit eden unsurun nereden ve nasıl şekilde geldiğini belirleyememektir. Gelişen RAM, işlemci (CPU) ve internet teknolojisi ile birlikte sayısal görüntü, ses ve video gibi işaretlerin kopyalanıp yayılması kolay bir hale gelmiştir. Her saniyede milyarlarca byte veri internet ortamında hızla yayılmaktadır. Bu veri kargaşasında verilerin nereden ve nasıl geldiğini belirlemek hayli zordur. Özellikle kötü amaçlı, zararlı olan verilerde bu verilerin nereden ve nasıl geldiği büyük önem taşır. Bu tür problemleri çözmek için ve internet aracılığıyla elde edilen bu bilgilerin aslına uygun olup olmadığını belirlemek amacıyla çeşitli şifreleme algoritmaları ve damgalama teknikleri geliştirilmektedir.

Şifreleme teknikleri klasik ve modern şifreleme olmak üzere ikiye ayrılır [1]. Klasik şifreleme tekniği, tarih öncesinden süre gelen basit aletler ile oluşturulan şifreleme tekniğidir. Modern şifreleme tekniği ise zamanla gelişen mekanik ve elektromekanik makinelerin keşfi ile ortaya çıkmıştır. Modern şifreleme tekniğinde çeşitli algoritmalar kullanılarak şifreleme sağlanmıştır. Bilgisayarın da keşfi ile birlikte

modern şifreleme tekniği gün geçtikçe gelişmektedir. Bilgisayarlar aracılığıyla modern teknikler kullanılarak şifreleme algoritmalarının kullanılması ve çeşitli şifreleme anahtarlarının geliştirilmesi verilerin güvenilirliğini artırmaktadır. Artan güvenilirlik ile kötü niyetli kişilerin verilere erişimi kısıtlanmaya çalışılmıştır. Fakat şifreleme yöntemleri ile veriler yeterli ölçüde korunamaz. Çünkü şifre çözüldüğü zaman saklanmak istenen veriye erişim kolay olacaktır. Bilgiye erişim ile birlikte kötü niyetli işlemler bilginin üzerine uygulanılabilecektir. Bu sebepten dolayı şifreleme kendi başına yeterli bir koruma sağlayamaz. Şifrelemenin bu eksikliklerini gidermek için sayısal damgalama (SD) yöntemleri [2, 3, 4] geliştirilmiştir. SD kullanımı verilerin güvenilirliği için tamamlayıcı bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [5].

Sayısal damgalamada damga adı verilen bir işaret sayısal işarete eklenir. Bu noktada en önemli olan husus damganın sayısal işarete, sayısal işareti bozmadan eklenmesidir. Damga, sayısal işareti bozmadığı sürece gizlilik ve güvenilirliği artırmış olur. Böylece veriyi kötü niyetli işlemlerden koruyarak verinin istenen yere zarar görmeden ulaşmasını sağlar. Aynı zamanda yasal olmayan kopyalama ve veri hırsızlığı da önlenmiş olur [6].

Sayısal damgalama ile verileri denetleme, veri doğrulama (sayısal verilerin orijinal olup olmadığı), hızlı biçimde veri arayıp bulma, gizli verilerin güvenli iletimi ve veri gizleme uygulamaları yapılır. Birçok alanda bu uygulamalara ihtiyaç olduğu için SD uygulamaları giderek yaygınlaşmaktadır. Farklı alanlardaki uygulamalarda ihtiyaç önceliklerine göre farklı damgalama teknikleri uygulanır. SD uygulamalarındaki bu ihtiyaçlar benzerlik, kapasite ve dayanıklılık olarak üç farklı şekilde belirtilebilir [7]. Benzerlik, orijinal ve damgalı veri arasındaki algısal benzerlik olarak tanımlanabilir. Eğer damgalamanın veriyi bozup algıdaki benzerliği değiştirmesini istemiyorsak buna uygun bir damgalama kullanılır. Bu uygulama sonrası orijinal veri ile damgalı veri arasında bir fark algılanamaz. Sadece yönteme özel algoritmalar ile damga olup olmadığı anlaşılabilir ve varsa çıkartılabilir. Kapasite, orijinal veride saklanabilecek maksimum bilgi miktarıdır. Eğer damgalamada önceliğimiz fazla miktarda bilgi gömmek ise en önemli ihtiyacımız orijinal verinin alabileceği bilgi miktarıdır yani

kapasitedir. Dayanıklılık, damgalı bir veriden kötü niyetli kişiler tarafından verinin güvenliğinin kırılıp saldırılara maruz kalması durumunda damgalı veriden damganın elde edilebilmesini ifade eder. Günümüzde internet ve veri paylaşım teknolojilerindeki veri trafiğini ve verilere karşı yapılan saldırıları göz önüne aldığımızda damgalamanın bu uygulaması (dayanıklılık) da hayli önemlidir. Fakat bir SD uygulamasında, bu ihtiyaçların hepsinin aynı anda giderilmesi olası değildir. Tasarımcı, uygulamaya göre önceliğini belirleyip buna göre bir SD uygulamalıdır.

Orijinal işarete uygulanacak olan sayısal damgalama, orijinal işarete bazı bozunumlara sebep olur ve orijinal işareti değiştirebilir. Damgalı işareten damga çıkartma veya bu damganın tespiti esnasında orijinal işareti, bozulmaların etkisinden kurtulmuş şekilde hatasız olarak elde edemeyebiliriz. Orijinal işaretlerdeki bu bozulmalar ise bazı uygulamalarda istenmez. Örneğin; tıbbi bir görüntüde meydana gelen bir bozulma yüzünden hastaya yanlış teşhis koyulmasıyla hastanın hayatına mal olunabilir. Benzer şekilde askeri uygulamalarda koordinat görüntüsünde oluşacak bozulma hedefleri yanılıp geri dönüşü olmayan sonuçlara sebep olabilir. Hassas verilere ihtiyaç duyulan bu uygulamalar için geliştirilmiş ve damgalanmış işareten orijinal işaretin hatasız olarak geri elde edilebildiği yöntemler genel olarak tersinir damgalama (TD) olarak adlandırılmaktadır [8, 9, 10]. TD ihtiyaç dahilinde birçok sayısal işaret için gerçekleştirilebilir. Fakat TD araştırmaları büyük ölçüde sayısal görüntü uygulamaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. TD yöntemi olmaksızın damgalı bir görüntüden damga geri elde edilebilir. Ancak orijinal görüntü çoğunlukla doğru bir şekilde geri elde edilemez. Aynı görüntüye TD yöntemi uygulanarak damga çıkarılmak istendiğinde damga çıkarılır ve aynı zamanda orijinal görüntü tam doğrulukta geri elde edilir. Bu bağlamda TD, görüntü damgalama uygulamalarında çok önemli bir yer tutmaktadır.

Sayısal görüntüde TD için geliştirilmiş birçok yöntem vardır. Fakat bunların birçoğu temelde 3 yonteme dayanmaktadır. Bu 3 yöntem fark genişletme (FG) [11, 12, 13, 14, 15, 16], histogram değiştirme (HD) [17, 18, 19, 20, 21, 22] ve öngörü hatasının genişletilmesi (ÖHG) [23, 24, 25, 26, 27, 28] olarak bilinen yöntemlerdir. Bu üç yöntemin temel fikri aynıdır. İlk olarak görüntünün temsili görüntüsü oluşturulur. Bu

temsili görüntüde boşluklar oluşturularak bu boşluklara damga eklenir. Daha sonra orijinal temsile geri dönülür. Böylece damgalı görüntü oluşturulur. Tersinir görüntü damgalamada (TGD) kullanılan bu yöntemler de temsili görüntüde boşluklar oluşturmak için görüntü piksellerinin arasındaki ilişkiden faydalanılır.

Tez aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. Tezimizde kullanılan yöntemler genelde TGD yöntemlerine dayalı olduğu için Bölüm 2’de TD özet olarak anlatılmış ve bazı TGD yöntemleri açıklanmıştır.

Bölüm 3’te TD yöntemlerinin kullanımına, uyarlanır genişletme ve piksel seçme teknikleri eklenecektir. Bu bölümde yöntemler görüntünün öngörü hata değerleri üzerine uygulanacaktır. Yardımcı görüntü, belirlenen bir öngörü algoritması ile elde edilip, orijinal görüntüden bu yardımcı görüntü çıkarılarak öngörü hatası hesaplanır. Öngörü hatası üzerinde uyarlanır damgalama ve piksel seçme teknikleri kullanılarak, damga eklenir. Bu bölümde ayrıca kapasite parametresi hesaplama, uyarlanır genişletme eşik değeri hesaplaması, damga ekleme, ek bilginin hazırlanması ve damga çıkartma işlemleri anlatılacaktır.

Bölüm 4’te yardımcı görüntüyü elde için ve damgalama adımlarında, Bölüm 3’tekinden farklı bir yöntem izlenmiştir. Bu bölümde aradeğerleme yöntemi kullanılarak yardımcı görüntü elde edilmiş ve damga ekleme algoritması ile damga eklenmiştir.

Bölüm 5’te görüntü damgalamada kullanılan farklı yöntemler karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

BÖLÜM 2. TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA

2.1. Giriş

Sayısal damgalama teknikleri uygulanan verilerde, bozulmalar meydana gelir. Damga çıkartılıp orijinal veri hatasız şekilde geri elde edilmek istendiğinde bu pek mümkün değildir. Orijinal verinin geri elde edilmesi istenen ve hassas verilere ihtiyaç duyulan uygulamalar için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Damgalanmış işaretten orijinal işaretin hatasız olarak geri elde edilebildiği yöntemler genel olarak tersinir damgalama (TD) olarak adlandırılmaktadır [9]. TD, görüntü damgalama uygulamalarında kullanılan önemli bir yöntemdir. Uzaktan algılama, askeri ve tıbbi uygulamalar veri kaybının istenmediği uygulamalardır ve bu gibi hassas verilere ihtiyaç duyulan uygulamalarda TD yöntemi sıklıkla kullanılır.

TD'da amaç, çok sayıda damga yerleştirmek ve bununla birlikte hedef verinin bozunumunu en az düzeyde tutmaktır. Literatür çalışmalarındaki incelemelerde mevcut yöntemlerin çoğunda kapasite yüksek tutulmakta fakat bozunum artmaktadır ya da tam tersi durum söz konusudur, bozunum az tutulurken kapasite azalmaktadır [13, 19]. Son zamanlardaki çalışmalar ile optimal kapasite parametresi belirlenmeye çalışılarak bu durum düzeltilmeye çalışılmıştır [23, 24, 25]. Damga miktarı artsa da görüntü kalitesinin yüksek seviyede tutulması, damgalama başarımının iyi olduğunu göstermektedir.

Damgalı görüntüden damga çıkartılırken bazı bilgilere ihtiyaç vardır. Bunlar, damgalama algoritmasında kullanılan parametreler ve damgalamanın bittiği son konum gibi bazı bilgiler olabilmektedir. Damgalamada damga bitleri ile birlikte bu ek bilgi bitleride görüntüye gömülmektedir. Damga çıkarımında ilk adım ek bilgilerin görüntüden geri elde edilmesidir. Elde edilen ek bilgiler yardımcı ile asıl

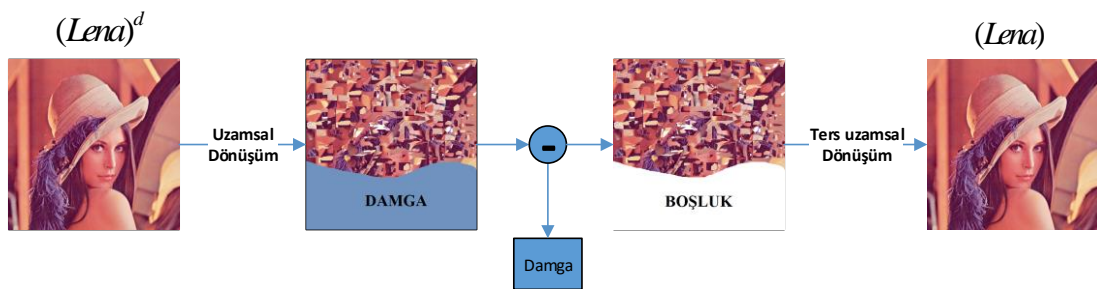
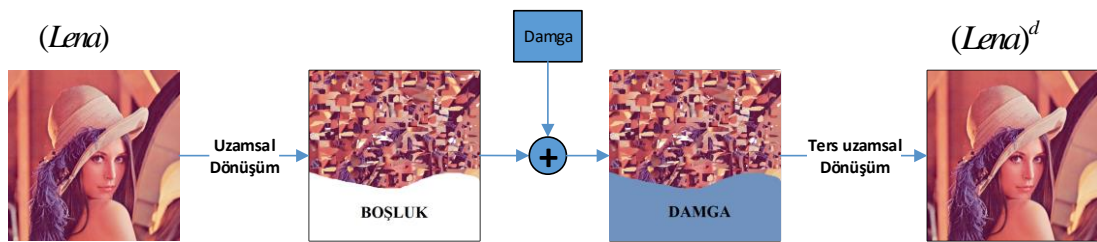
damga verileri çıkartılmaktadır. Bundan dolayı damga çıkarımında kullanılacak ek bilgiler, damganın görüntüden en iyi şekilde çıkarılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Bu tezde TGD için iki temel yöntem incelenmiştir. Bu iki yöntem anlatılmadan önce TGD'nin temel fikri anlatılacaktır.

2.2. TD'nin Temel Fikri

Verilen temsili görüntü damgalama algoritmalarının temelini oluşturmak için TD'nin ana mantığı ve temel algoritmaları bu bölümde incelenmektedir.

TD yöntemlerinin dayandığı temel fikir şu şekildedir. Orijinal işaretin temsil uzayından farklı bir uzayda işaret temsil edilir ve farklı uzayda oluşturduğumuz işarete verileri gizlemek için boşluklar oluşturulur [9, 18]. Yeni uzayda temsil işarete oluşturduğumuz boşluklar veri gizlendikten sonra orijinal temsile geri dönülür [18]. Böylece damgalı işaret oluşturulmuş olur. Anlatılan bu işlemler Şekil 2.1.'de Lena görüntüsü için gösterilmektedir.



Burada ilk olarak (*Lena*) orijinal görüntüsü uzamsal dönüşüme tabi tutulur. Uzamsal dönüşümden sonra (*Lena*) görüntüsünde boşluk oluşmaktadır. Oluşan bu boşluğa belirlenen tersinir damga ekleme algoritması ile damga eklenir. Damga eklenmiş yeni temsili işaret ters uzamsal dönüşüme tabi tutulur. Böylece damgalı görüntü (*Lena*)^d elde edilmektedir. Damgalı görüntüden damga çıkartılması işlemleri ise yukarıda Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Damga çıkarma algoritmasında, damga ekleme algoritmasında yapılan işlemler ters izlenen bir yol ile uygulanmaktadır.

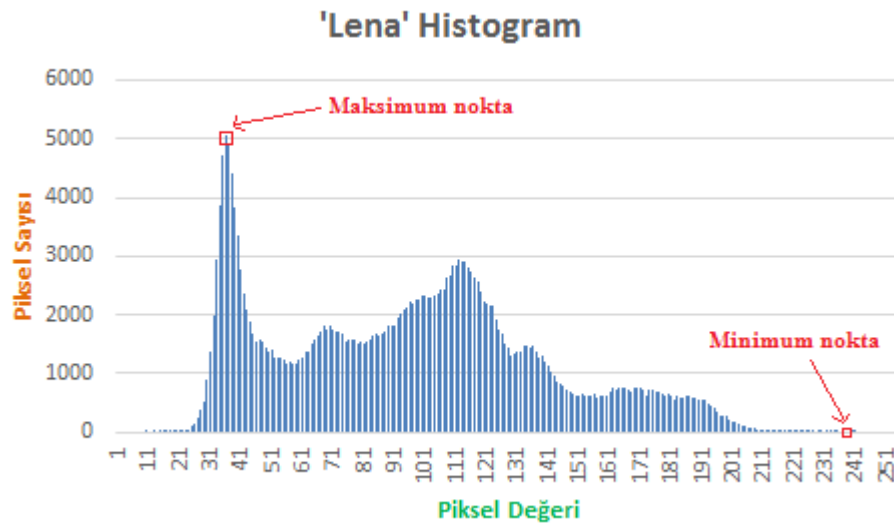
Damga eklemede kullandığımız uzamsal dönüşüm, oluşturduğumuz boşluk miktarını, dolayısıyla eklenebilecek damga miktarını etkiler. Damga ekleme yöntemi ise işarete oluşacak bozunumu etkiler. Damga miktarının ve bozunumunun etkilerinin birleşimi ile bir TD yönteminin performansı belirlenmiş olur [12]. Bir sonraki kısımda görüntü için geliştirilmiş, TD'daki ana yöntemler incelenecektir.

2.3. Tersinir Görüntü Damgalama Algoritmaları

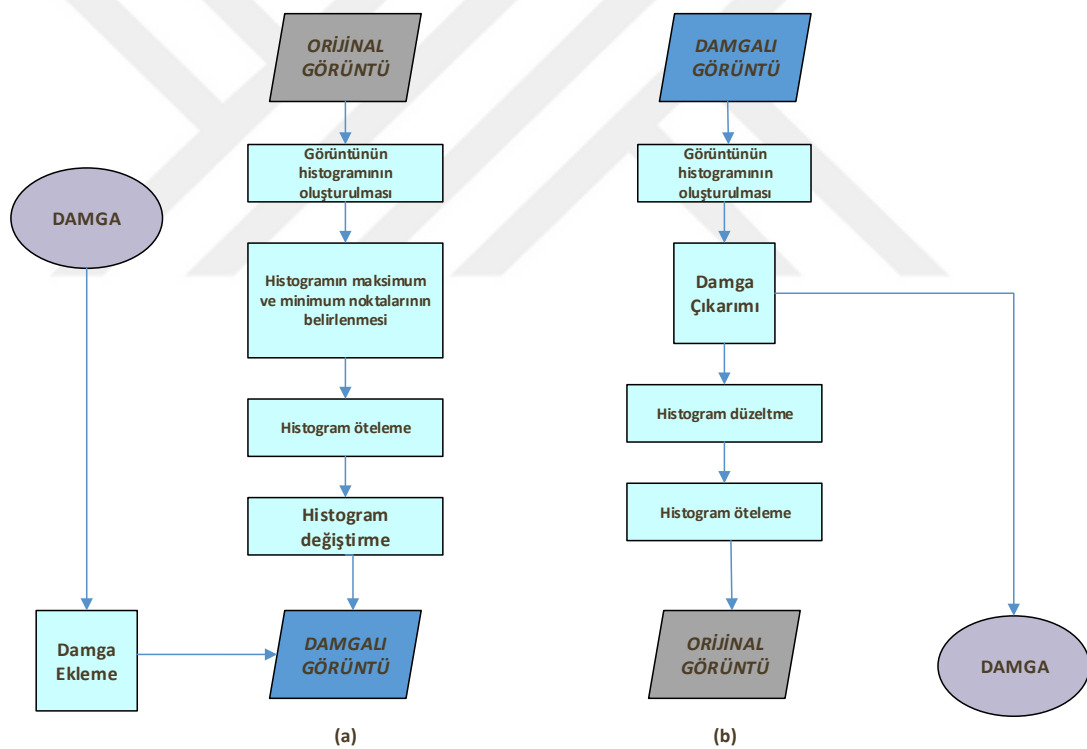
Bu bölümde mevcut TGD yöntemlerinden histogram değiştirme (HD) ve öngörü hatasının genişletilmesi (ÖHG) olmak üzere iki yöntem incelenmiştir.

2.3.1. Histogram değiştirme

Histogram değiştirme (HD) yöntemi, görüntünün histogramından yararlanarak yüksek kapasite ve düşük bozunumlu damgalama gerçekleştiren bir tersinir damgalama yöntemidir [18]. Histogram değiştirme modülasyonunun temel ilkesi, görüntü histogramındaki tepe noktası kadar boşluk oluşturmak ve bu boşluklara damga bitlerini ('0' veya '1') eklemektir. Bu işlemin sonucunda damgalanmış görüntü oluşturulmuş olur. Örneğin *Lena* görüntüsüne ait histogram, histogramın üzerinde tepe ve sıfır noktaları Şekil 2.3.'te gösterilmiştir. *Lena* histogramındaki tepe değeri 5056'dır. Dolayısıyla görüntüye eklenebilecek damga sayısı 5056 bittir. Damgalı görüntüden damgayı çıkarmak için ihtiyacımız olan ek bilgiler kısmına, Şekil 2.3.'deki histogramın tepe ve sıfır noktaları ek bilgi olarak kaydedilecektir.



Şekil 2.3. Lena görüntüsüne ait histogram



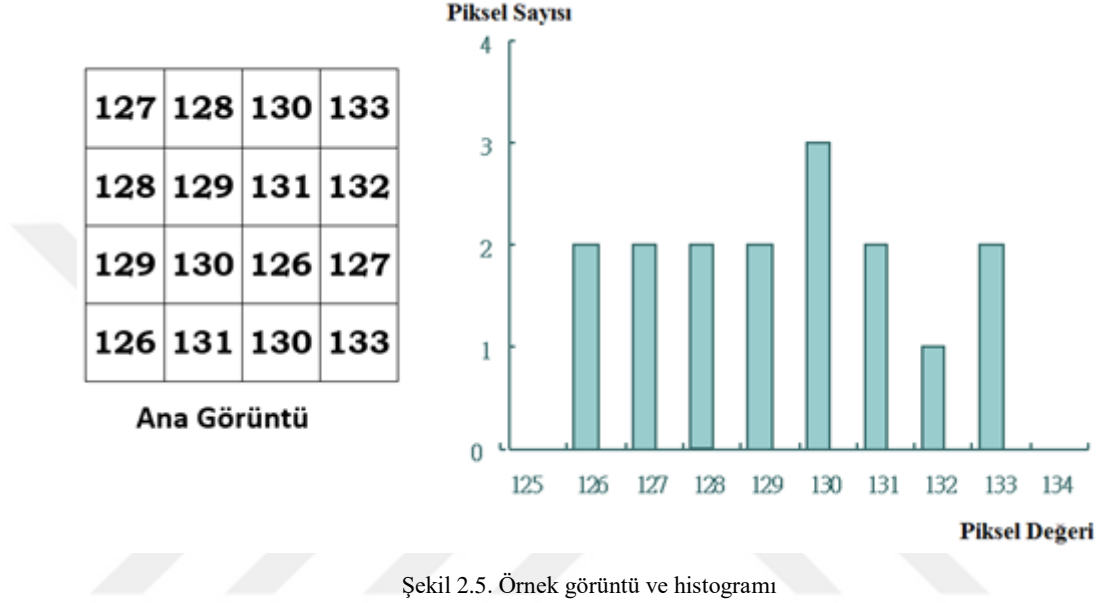
Şekil 2.4. HD'ye karşılık gelen blok diyagram (a) damga ekleme (b) damga çıkartımı

HD yöntemine ait blok diyagramı yukarıda Şekil 2.4.(a) ve Şekil 2.4.(b) gösterilmiştir. Yöntem, aşağıda 4x4 örnek bir görüntü üzerinden şekil, grafik ve piksel değerleri üzerinden adım adım anlatılacaktır.

Aşağıda verilen işlemler uygulanarak damgalı görüntü elde edilir. 4 adımda veri ekleme algoritması koşturulmaktadır.

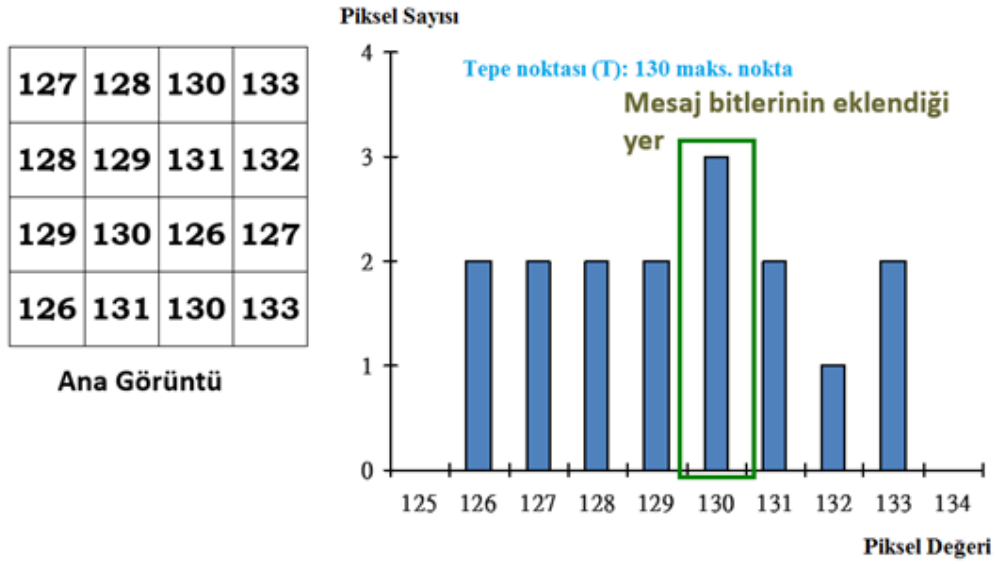
Adım 1: Histogramın oluşturulması

Görüntünün histogramı hesaplanır.



Adım 2: Maksimum ve Minimum Noktaların Belirlenmesi

Şekil 2.5.'deki gibi örnek görüntü histogramı oluşturulur ve histogram üzerinde bir tepe birde sıfır noktası belirlenir. Tepe noktası, görüntüde en fazla karşılaşılan parlaklık değerine, sıfır noktası ise hiç karşılaşılmayan veya en az karşılaşılan parlaklık değerine karşılık gelir.



Şekil 2.6. Örnek görüntü ve histogramında tepe noktası

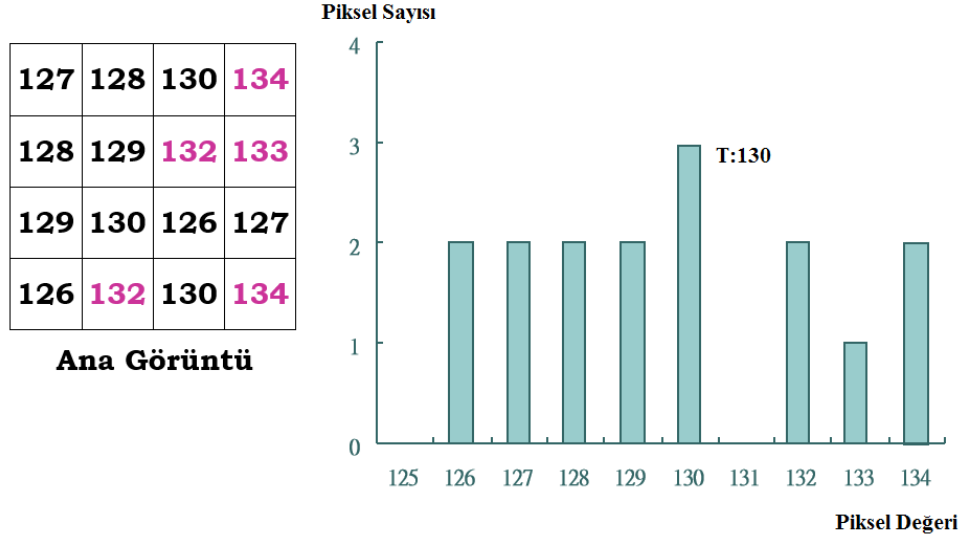
Şekil 2.6.'da damgalanacak görüntü, histogramı ve histogram üzerindeki tepe noktasını görmekteyiz. Bu histogramdaki tepe değeri 130 piksel değerinin karşılık gelen 3 sayısıdır. Buda bize eklenebilecek maksimum bit sayısını göstermektedir. Tepe noktasının damga ekleme işlemi için kullanılmasında maksimum kapasiteye ulaşmak hedeflenmiştir. Ayrıca burada sıfır noktamızı ise 134 piksel değerli kısmı kabul edebiliriz.

Adım 3: Kaydırma İşlemi

Tepe ve sıfır noktasını belirlediğimiz görüntü histogramı elde edildikten sonra, görüntüdeki tüm pikseller belli bir ardışıl sıra ile (örneğin soldan sağa ve yukarıdan aşağıya) taranır. Tepe ve sıfır noktaları arasındaki piksel değerleri '1' artırılarak histogram (tepe noktası, sıfır noktası aralığında) bir birim sağa kaydırılır. Şekil 2.6.'daki histogram için, (130,134) aralığındaki piksellerin değeri '1' artırılmış olur. Bu işlem sonucunda histogram üzerinde tepe noktasının bir fazlası yani 131 değeri boşaltılmış olur. Ayrıca, sıfır noktasının bir eksiği yani 133 değerindeki pikseller ise sıfır noktasına taşınmış olur. Şekil 2.7.'de kaydırılmış histogram gösterilmektedir. Burada mor renkli piksel değerleri ötelenen piksellerdir.

$P_i = P_i + 1$, eğer $P_i > T$

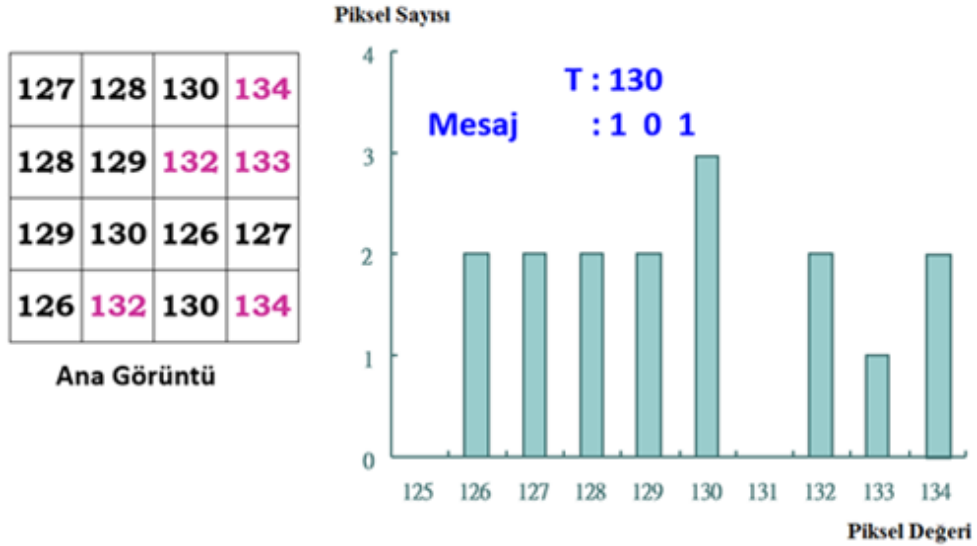
$P_i = P_i$, diğeri



Şekil 2.7. Örnek görüntü ve kaydırılmış histogram

Adım 4: Veri Ekleme

Tüm piksel değerleri yeniden aynı ardışıl sırada taranır. Bir tepe noktası ile karşılaşıldığında eklenecek bit değerine bakılır; eğer '1' eklenecekse tepe noktasının değeri bir arttırılır. Aksi halde, yani eğer '0' eklenecekse tepe noktasının değeri değiştirilmez. Örnek görüntümüzden işlemlerimize devam edecek olursak aşağıdaki şekiller ve işlemleri inceleyelim.

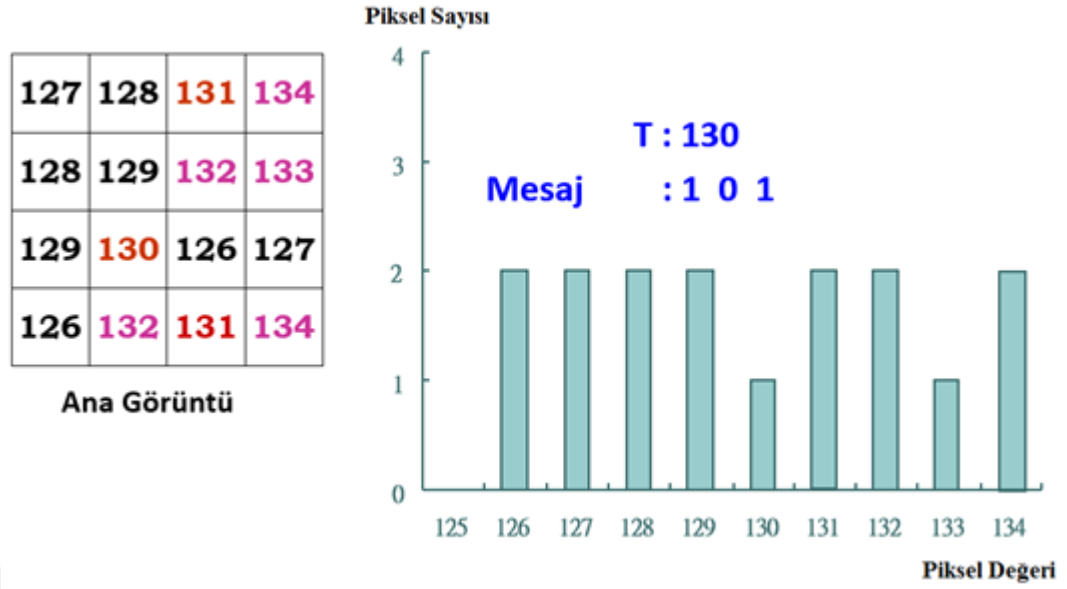


Şekil 2.8. Örnek görüntü, kaydırılmış histogram ve eklenecek damga

$$T_i = T_i + 1, \text{ if } B_i = 1$$

$$T_i = T_i, \text{ diğer}$$

Görüntümüze örnek damga olarak Şekil 2.8.'de de gördüğümüz gibi [1 0 1] eklediğimizi düşünelim. Görüntü tarandığında 1. Satır 3. Sütunda $T=130$ tepe noktasına rastlanacaktır. Mesajımızdaki ilk değer buraya gömülecektir. İlk mesaj değerimiz '1' değeridir. Dolayısıyla $T=130$ değerimiz $T=T+1$ işlemi ile birlikte damgalanacak ve 131 değeri alacaktır. Sonrasında görüntü taranmaya devam edecektir. Ve ikinci tepe değer 3. Satır 2. Sütunda bulunacaktır. Mesajımıza baktığımızda ikinci değerinin '0' olduğu görülmektedir. Damga '0' değerinde olduğu için $T=T$ olacak ve taramaya devam edilecektir. Son tepe noktamız olan değer 4. Satır 3. Sütunda bulunacaktır. Damgamızın ise son değeri '1' değeridir. Burada da $T=T+1$ işlemi yapılarak bu değerimizde damgalanır ve 131 değerini alır. Böylece 131 piksel değerinde öteleme ile oluşturduğumuz boşluğa damgaların iki tanesini yerleştirmiş olduk. Bir damga ise damga değeri '0' olduğu için maksimum noktasında kaldı. Bu işlemleri Şekil 2.9.'da görmekteyiz.



Şekil 2.9. Örnek görüntünün damgalanmış hali ve histogramı

Şekil 2.9.'da görüntü piksel değerlerinde mor renkteki pikseller ötelenen pikselleri kırmızı olan pikseller ise damgalanan pikselleri göstermektedir. Gördüğümüz gibi 3 olan tepe değerimize 2 adet '1' ve 1 adet '0' değeri damgalayarak 131' de oluşturduğumuz boşluğa 2 adet değer eklemiş olup 130' da ki değerimiz 1'e inmiştir. Ayrıca öteleme işlemlerimizden dolayı da sıfır noktası olarak kabul ettiğimiz 134 değerine de öteleme işlemi yapmadan önceki 133 piksel değerinin sayısı gelmiş oldu.

HD tekniğinde, eklenecek veri içine başlık bilgisi olarak tepe ve sıfır noktalarının değerleri eklenir. Ayrıca, bu teknik birden fazla tepe ve sıfır noktası çiftleri için uygulanarak kapasite artırılabilir. Bir görüntünün histogramın da her zaman bir sıfır noktası bulunmayabilir. Böyle durumlarda histogramın minimum noktası sıfır noktası olarak kullanılır ve bu minimum noktaya karşılık gelen piksel değerleri, koordinatları ile birlikte başlık bilgisi içinde damga çözücüye gönderilir.

Aşağıda verilen adımlar uygulanarak orijinal görüntü geri elde edilir ve damga çıkartılır. Orijinal görüntü histogramında tepe noktası 130, sıfır noktası 134'dür. Buna göre işlemler yapıldığında.

Adım 1: Damgalanmış görüntü, ekleme algoritmasında kullanılan ardışıl tarama ile taranır. Değeri tepe noktası +1 olan bir piksel değeri ile karşılaşıldığında bu pikselden '1' bilgisi damga olarak çıkartılır. Eğer karşılaşılan piksel değeri tepe noktasına karşılık gelirse bu durumda '0' bilgisi damga olarak çıkartılır. Yani damgalanmış görüntüde 131 değeri '1' damga bitini 130 değeri ise '0' damga bitini temsil eder.

127	128	131	134	T = 130 Mesaj : 1 0 1 $B_i = 1, \text{ if } P_i = T + 1$ $B_i = 0, \text{ if } P_i = T$
128	129	132	133	
129	130	126	127	
126	132	131	134	

Maskelenmiş

Şekil 2.10. Maskelenmiş görüntü ve damga çıkarmak için uygulanacak işlemler.

Şekil 2.10.'da 1. Satır 3. sütunda 131 değerinden şekildeki işlem uygulanarak '1' değerinde damgayı elde ederiz. Sonra 3. Satır 2. Sütundaki 130 değerinden aynı şekilde bu sefer '0' değerinde damgayı ve son olarak 4. Satır 3. Sütundaki 131 değerinden '1' değerinde damgayı elde ederiz. Böylece damgamızı [1 0 1] olarak bulmuş oluruz.

127	128	131	134	T = 130 Mesaj : 1 0 1 $P_i = P_i - 1, \text{ if } P_i > T$ $P_i = P_i, \text{ diğer}$
128	129	132	133	
129	130	126	127	
126	132	131	134	

Maskelenmiş

Şekil 2.11. Maskelenmiş görüntü ve orijinal görüntüye geri dönmek için uygulanacak işlemler.

Adım 2: Damga bilgisi çıkartıldıktan sonra, görüntü yine aynı ardışıl tarama ile taranır. Tepe noktası (hariç) ile sıfır noktası (dahil) arasında bir piksel değeri ile karşılaşıldığında bu pikselin değeri 1 azaltılarak damga ekleme adımında yapılan histogram kaydırma işleminin tersi gerçekleştirilir. Yani histogramda (130,134] aralığı bir birim sola kaydırılmış olur. Bu işlem için Şekil 2.11.'i inceleyiniz.

127	128	130	133	$T = 130$ Message : 1 0 1 $P_i = P_i - 1$, if $P_i > T$ $P_i = P_i$, diğer
128	129	131	132	
129	130	126	127	
126	131	130	133	

Maskelenmiş

Şekil 2.12. Maskelenmiş görüntü ve orijinal görüntüye geri dönmek için görüntüye işlemin uygulanmış hali

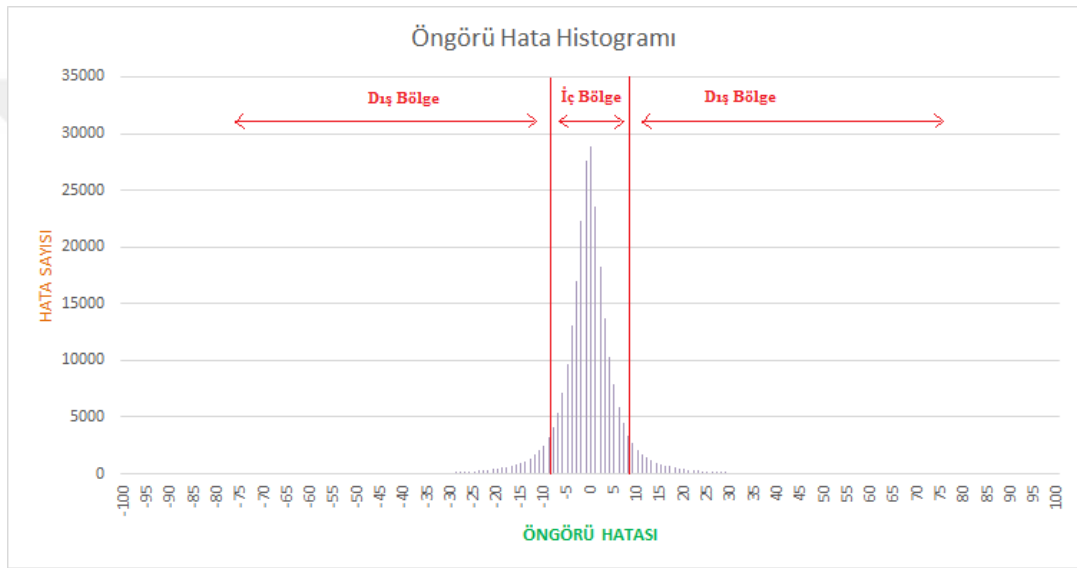
Şekil 2.12.'de gördüğümüz gibi maskeli görüntüden damgayı çıkardıktan sonra histogram kaydırma işleminin tersi yapılarak piksel değerlerimiz orijinal değerlerini sırasıyla alıyor. Tüm piksellere bu işlem uygulandıktan sonra orijinal görüntü elde edilmektedir.

2.3.2. Öngörü hatasının genişletilmesi

ÖHG yöntemine dayalı ilk TGD yöntemi Thodi ve Rodriguez tarafından sunulmuştur [24]. ÖHG yöntemi TGD yöntemlerinden FG ve HD yöntemlerinin üstünlükleri birleştirilerek meydana getirilmiştir. ÖHG yöntemi ile FG ve HD' den elde edilen sonuçlardan daha iyi sonuçlar ortaya koyulmaktadır [29].

ÖHG yönteminde ilk olarak, uygun bir öngörü algoritmasıyla görüntünün öngörüsü (\bar{I}) oluşturulur. Öngörü, orijinal görüntünün tahmin edilerek elde edildiği görüntüdür. Literatürde görüntüler için çeşitli öngörü algoritmaları sunulmuştur [30, 31]. Daha sonra öngörü hatası $h = I - \bar{I}$ eşitliğinden hesaplanır. Tüm görüntü için

hata hesaplandığında Öngörü Hatası Görüntüsü (ÖHG) oluşturulur. ÖHG'nin histogramı çıkartılır. ÖHG histogramı genelde Şekil 2.13.'deki gibidir. Eşik değeri kullanarak histogram iki bölgeye ayrılır. Eşik değeri t olduğuna düşünürsek, $h \in [-t, t)$ ise (h) iç bölgede, aksi halde dış bölgedir. Dış bölgede kalan pikseller öteleme işlemine tabi tutulur. Bu işlem sayesinde iç bölgede kalan piksellerin damgalanabilmesi için boşluklar oluşturulmuş olur. Çerçeveye eklenebilecek maksimum bilgi miktarını, iç bölgedeki piksel sayısı veya eşik değeri t belirlemektedir. Bu nedenle t 'ye kapasite parametresi denilmektedir.



Şekil 2.13. ÖHG histogramı ve bölgelere ayrılması (hesaplamalar lena görüntüsü için yapılmıştır).

ÖHG ve kapasite parametresi belirleme işlemleri tamamlandıktan sonra orijinal görüntünün pikselleri belirli bir sırada taranır. Sonrasında aşağıda verilen işlemlere tabi tutularak damgalı görüntü elde edilir. İfadelerde t kapasite parametresini, $b \in \{0,1\}$ eklenecek damga bitini, h^d damgalı öngörü hatasını ve I^d damgalanmış piksel değerini belirtmektedir.

a. $h \in [-t, t)$ ise, öngörü hatası

$$h^d = 2h + b \quad (2.1)$$

eşitliği kullanılarak genişletilir. Daha sonra, damgalı piksel değeri

$$I^d = \bar{I} + h^d \quad (2.2)$$

ifadesinden elde edilir.

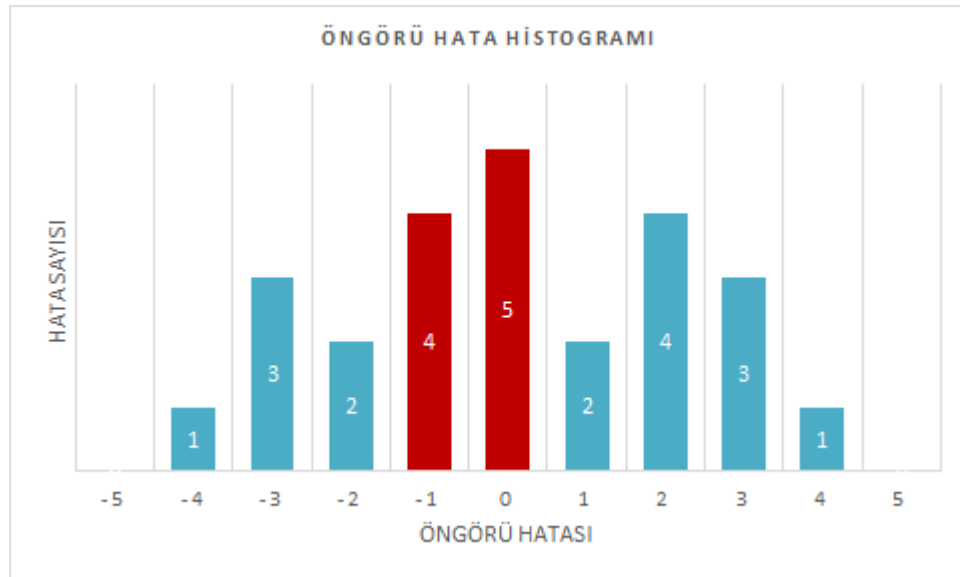
b. $h \notin [-t, t)$ ise, damgalı piksel değeri öteleme işlemine tabi tutularak,

$$I^d = \begin{cases} I + t, & h \geq t \\ I - t, & h < -t \end{cases} \quad (2.3)$$

eşitliğinden hesaplanır.

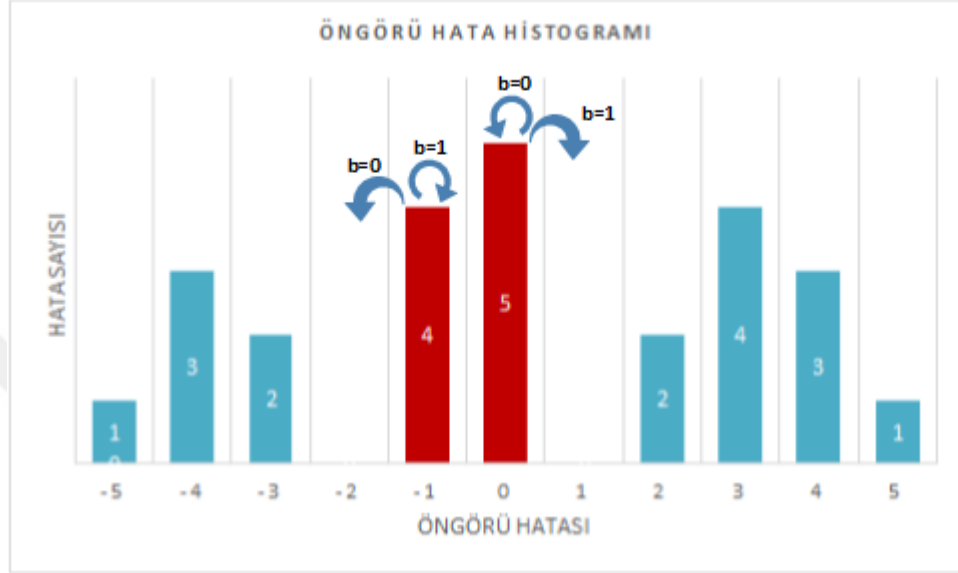
Yukarıda incelediğimiz bu işlemleri örnek iki görüntü için görüntülerin öngörü hata histogramı üzerinde uygulayalım. Birinci görüntümüzde eşik değeri $t=1$, ikinci görüntümüzde eşik değeri $t=3$ olsun.

İlk görüntü için öngörü hata histogramı çıkarılır. Hata histogramının iç ve dış bölgesi belirlenir.



Şekil 2.14. $t=1$ için görüntünün öngörü hata histogramı

Şekil 2.14.'de ilk görüntümüzün öngörü hata histogramı üzerinde belirlenen iç bölgedeki ve dış bölgedeki pikselleri görmekteyiz. Hata aralığımız $h \in [-1,1)$ olduğu için dış bölgedeki piksellerimiz mavi renkli olanlar, iç bölgedeki piksellerimiz kırmızı renkli olanlardır.



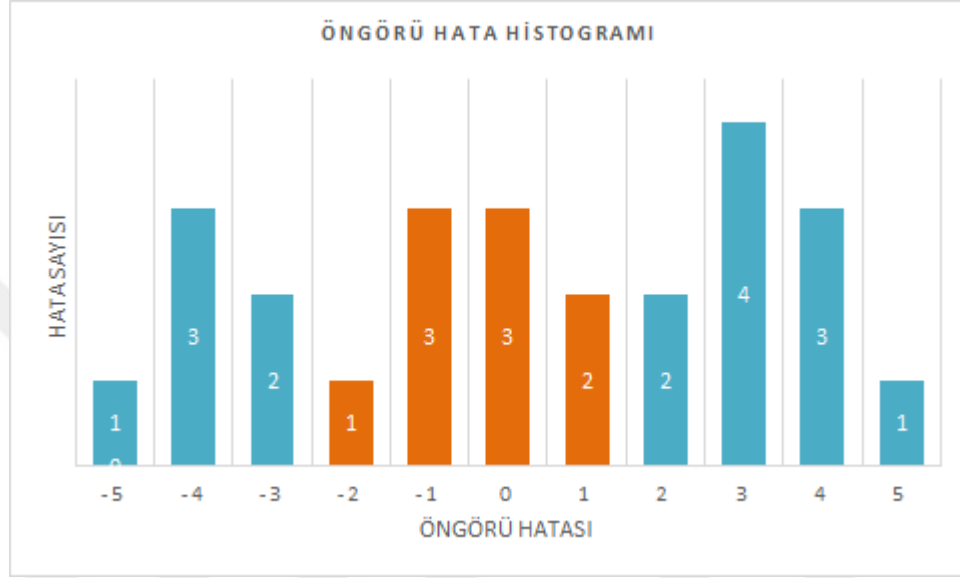
Şekil 2.15. $t=1$ için ötelenmiş öngörü hata histogramı

İç ve dış bölgedeki pikseller belirlendikten sonra dış bölgedeki piksellere (şekillerdeki mavi renkteki hataların olduğu pikseller) Denklem (2.3)'dan faydalanarak öteleme işlemi uygulanır. Öteleme işleminin ardından eşik değerimizin boyutuna göre boşluklar oluştuğunu görmekteyiz. Burada $t=1$ olduğu için 1 birim öteleme ile iç bölgenin iki tarafında Denklem (2.3)'e göre birer birim boşluk oluşmuştur.

Öteleme sonrası iç bölgedeki hatalar damgalama işlemi için kullanılır. Damgalama sonrasında boşluklara, damgalı hata değerleri gelerek bu boşluklar dolmaktadır.

Şekil 2.15. incelenirse öngörü hatası (0) olan 5 adet pikselin olduğu görülür. Öngörü hatası sıfır olan bu piksellerden 2 tanesi '1' bit damgalanmış, 3 tanesi ise '0' bit damgalanmıştır. Denklem (2.1)'e göre damgalama işlemi yapıldığında 1 bit ile damgalanan pikseller hatanın (1) olduğu boşluğa yerleşmiştir. '0' bit ile damgalanan pikseller Denklem (2.1)'e göre aynı yerinde kalmıştır. Öngörü hatası (-1) olan 4 adet

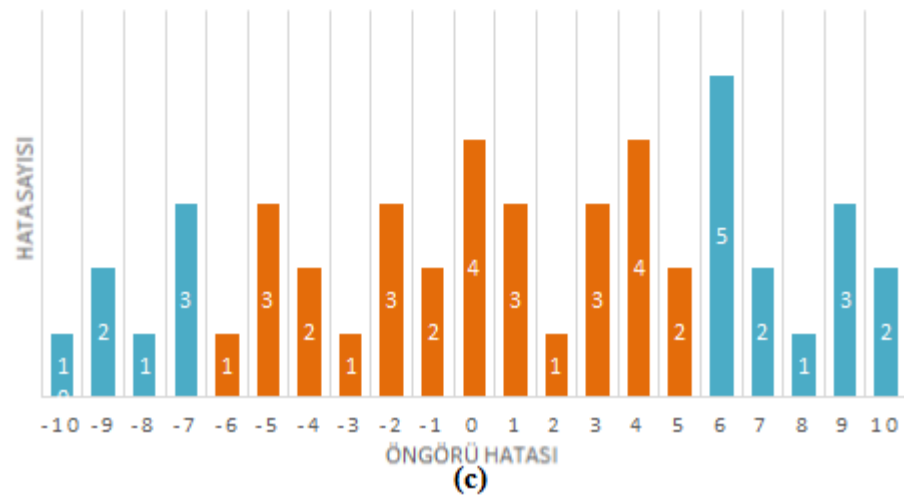
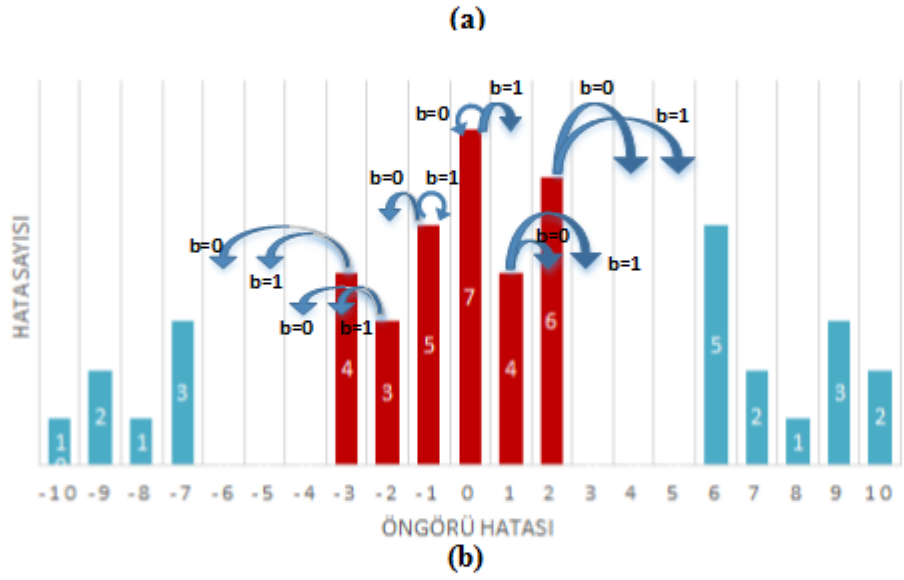
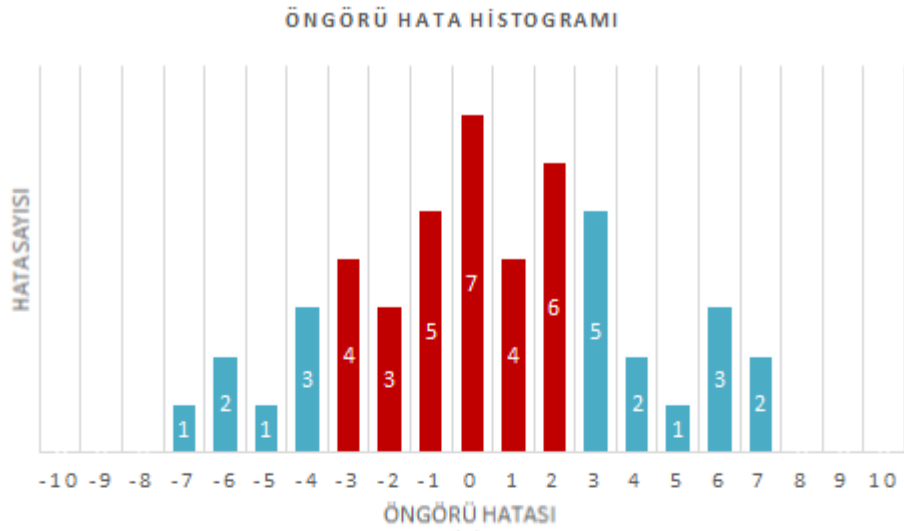
piksel de ise 3 adet piksel '1' bit damgalanmış ve 1 adet piksel '0' bit damgalanmıştır. 0 bit damgalanan piksel hatanın (-2) olduğu boşluğa yerleşmiştir. Şekil 2.16.'da damgalama sonrası histogramı görmekteyiz. Bu histogramda oluşturulan boşluklar damgalama ile dolmuştur. Damgalı hata aralığı Şekil 2.16.'da turuncu renkte görülmektedir.



Şekil 2.16. $t=1$ için damgalanmış öngörü hata histogramı

Yukarıda $t=1$ için örnek bir görüntünün öngörü hata histogramı üzerinde damgalama adımlarını inceledik. Şekil 2.17.'de ise $t=3$ durumunda başka bir görüntünün öngörü hata histogramı üzerinde damgalama adımlarını gösterilmiştir. Yukarıda gösterilen damgalama adımlarındaki işlemlerin aynısı eşik değer $t=3$ içinde uygulanmıştır.

İkinci görüntü öngörü hatası histogramı için damgalama yapacağımız aralık $h \in [-3,3)$ olduğu aralıktır. Bunun dışındaki bölge Denklem (2.3)'e göre ötelenir. Bu ötelemede görmekteyiz ki damgalama yapacağımız aralığın iki yanında bu sefer 3'er birimlik boşluklar meydana gelmiştir. Daha sonra damga aralığındaki hatalar damgalanarak bu boşluklara yerleşmiştir. Eşik değer $t=3$ için incelediğimiz bu görüntünün öngörü hata histogramı, bu histogramın ötelenmiş hali ve damgalı hata histogramı Şekil 2.17.'de gösterilmiştir. Damgalı hata aralığı turuncu renkle belirtilmiştir.



Şekil 2.17. (a) $t=3$ için görüntünün öngörü hata histogramı (b) Ötelenmiş öngörü hata histogramı (c) Damgalanmış öngörü hata histogramı

Şekil 2.17.'de $h \in [-3,3)$ aralığındaki hatalara kaç adet ve hangi damga biti yüklendiği Tablo 2.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. İkinci görüntü öngörü hatası histogramı için damgalanacak hata ve damga sayıları

Öngörü Hatası	Adet	'0' bit sayısı	'1' bit sayısı
-3	4	1	3
-2	3	2	1
-1	5	3	2
0	7	4	3
1	4	1	3
2	6	4	2

Tablo 2.1.'de adetleri gösterilen bu damgalanan bitlerin damgalandıktan sonra yerleştiği bloklar Şekil 2.17.(b)'de gösterilmiştir. Damgalama sonrası tablodaki adetlere göre olan dağılım ise damgalı öngörü hata histogramı, Şekil 2.17.(c)'de görülmektedir.

BÖLÜM 3. ÖNGÖRÜ HATALARININ UYARLANIR GENİŞLETİLMESİNE DAYALI TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA VE PİKSEL SEÇME

3.1. Giriş

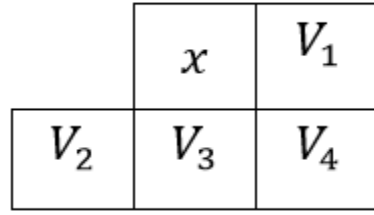
Bu bölümde öngörü hatasının genişletilmesine dayalı bir uyarlanir tersinir damgalama yöntemi ve bununla birlikte uygulanacak piksel seçimi tekniği tartışılacaktır [25]. İncelenen yöntemde damga ekleme - çıkarma algoritmaları, bu algoritmalarda kullanılacak parametrelerin nasıl belirlendiği ve bu parametrelerin görüntü üzerindeki etkisi anlatılmıştır. Sonuç bölümünde deney sonuç görüntüleri incelenmiştir.

3.2. Altyapı

Kullanılan algoritmalar damga ekleme, piksel seçme ve uyarlamalı damgalama algoritmalarıdır. Uyarlanir damgalama ve piksel seçimi algoritmaları incelenen yöntemin temelini oluşturmaktadır. Bu algoritmaları uygulayabilmek için ilk olarak işlem göreceği olan görüntünün öngörüsü elde edilmelidir. Öngörü oluşturmak için kullanılan yöntem ve öngörüye sırasıyla uygulanan adımlar aşağıda anlatılmaktadır.

3.2.1. Öngörünün oluşturulması

Görüntüye belirlenen algoritmaların (uyarlanir damgalama, piksel seçimi ve tersinir damgalama) uygulanması için ilk olarak, uygun bir öngörü yöntemiyle görüntünün öngörüsü oluşturulur. Literatürde görüntüler için çeşitli öngörü algoritmaları sunulmuştur [30, 31]. Thodi ve Rodrigez, çalışmalarında ortalama kenar tahmini yöntemini kullanmıştır [32]. Bu yöntemde hesaplamalarda kullanılan pikseller Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Bir pikselin öngörüsünün hesaplanmasında kullanılan pikseller

x pikselinin \bar{x} ile belirtilen öngörüsü,

$$\bar{x} = \begin{cases} \min(V_1, V_3), & V_4 \geq \max(V_1, V_3) \\ \max(V_1, V_3), & V_4 \leq \min(V_1, V_3) \\ V_1 + V_3 - V_2, & \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır.

Yukarıda örnek bir öngörü yönteminin uygulanışını görmekteyiz. Öngörü Hatasının Genişletilmesi bölümünde anlattığımız öngörü hatasını bulma işleminin ilk adımı, bu şekilde bir görüntüye uygun bir öngörü yönteminin uygulanması ile başlar. Görüntünün öngörüsü elde edildikten sonra öngörü hatası $h = x - \bar{x}$ eşitliğinden belirlenir. Tüm pikseller için uygulandığında görüntünün öngörü hatası bulunur. Sonrasında gerekli işlemlere devam edilerek belirlenen algoritmalar uygulanır.

3.2.2. Uyarlanabilir damgalama

Bir pikselin 1 bit ile damgalanması durumunda piksellerde oluşan ortalama bozunum,

$$B_1(h) = E[(I^d(i, j) - I(i, j))^2] \quad (3.1)$$

ortalama karesel hata eşitliğinden hesaplanabilir [25]. Burada;

$$I^d = \bar{I} + h^d, \quad I^d = (I - h) + (2h + b), \quad I^d = I + h + b$$

eşitlikleri Denklem (3.1)'de yerine koyulursa,

$$E \left[\left(I^d(i, j) - I(i, j) \right)^2 \right] = E[(I + h + b - I)^2] = E[(h + b)^2] \quad (3.2)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik hesaplandığında ortalama bozunum,

$$B_1(h) = E[(h + b)^2] = \frac{1}{2} \sum_{b \in \{0,1\}} (h + b)^2 = h^2 + h + 0,5 \quad (3.3)$$

olarak elde edilir.

Öngörü hatasının 2 bit ile damgalanması durumunda piksellerde oluşan ortalama bozunumun hesabı aşağıdaki gibidir. (2 bit damgalamada $b_1, b_2 \in \{0,1\}$)

Damgalı piksel değeri,

$$I^d = \bar{I} + 2(2h + b_1) + b_2 = \bar{I} + 4h + 2b_1 + b_2 = I + 3h + 2b_1 + b_2$$

eşitliğinden hesaplanır. Ortalama bozunum ise,

$$E \left[\left(I^d(i, j) - I(i, j) \right)^2 \right] = E[(I + 3h + 2b_1 + b_2 - I)^2] = E[(3h + 2b_1 + b_2)^2]$$

$$\begin{aligned} B_2(h) = E[(3h + 2b_1 + b_2)^2] &= \frac{1}{4} \sum_{b_1, b_2 \in \{0,1\}} (3h + 2b_1 + b_2)^2 \\ &= 9h^2 + 9h + 3,5 \end{aligned} \quad (3.4)$$

olarak elde edilir.

Yukarıdaki Denklem (3.3) ve Denklem (3.4) denklemlerini incelediğimizde öngörü hatalarının aynı olması durumunda bir pikseli 2 bit ile damgalama, 1 bit ile damgalamaya göre daha fazla bozuluma sebebiyet verir ($B_2(h) \geq B_1(h)$). Fakat öngörü hataları aynı değilse ve $|h_1|, |h_2|$ 'den yeterince büyük ise $B_1(h_1) > B_2(h_2)$ olur. Böylece h_1 aldığı yeterli büyüklük ile birlikte 1 bit damgalamada daha fazla

bozunuma neden olabilir. Bu durumlar göz önüne alındığında öngörü hatası küçük olan bir pikseli 2 bit ile damgalamak, öngörü hatası yeterince büyük olan bir pikseli 1 bit ile damgalamaya göre daha az bozunuma neden olur.

Yukarıdaki gibi her pikselin öngörü hatasının aldığı değere göre piksellerin farklı sayıda bit ile damgalanmasına uyarlanır damgalama denir. Bu uygulama ile minimum bozulma ile maksimum kapasite hedeflenmektedir.

Uyarlanır damgalamada hangi piksellerin 1 bit hangi piksellerin 2 bit damgalanacağını belirlemek amacıyla pikseller düzgün ve düzgün olmayan şeklinde iki sınıfa ayrılır. Bu sınıflandırma için ise görüntü piksellerinin komşuluk ilişkisinden yararlanarak hesaplanan standart sapması ileri varyans (FV) kullanılmaktadır [25].

Tüm piksellerin FV'si hesaplanır ve pikseller FV değerlerine göre düzgün ve düzgün olmayan şekilde ikiye ayrılır. Uyarlanır damgalama eşik değerinden (Δ_{tae}) küçük FV'ye sahip olan pikseller düzgün, FV'si Δ_{tae} 'den büyük olan pikseller düzgün olmayan pikseller olarak adlandırılır [25]. Düşük öngörü hatasına sahip olan düzgün bölgedeki pikseller 2 bit ile damgalanabilir iken yüksek öngörü hatasına sahip düzgün olmayan bölgedeki pikseller 1 bit ile damgalanabilir.

3.2.3. Piksel seçme

Görüntüye uygulanacak olan yöntemde 2 bit ve 1 bit damgalama yapılan pikseller haricindeki piksellere öteleme işlemi yapılacaktır. Yapılan öteleme işlemleri ile görüntüde bozulmalar meydana gelecektir. Bu bozulmaları azaltmak için damga ekleme esnasında ötelenecek piksel sayısı azaltılabilir. Eğer ötelenecek piksel sayısı istenilen şekilde azaltılabilirse görüntü kalitesinde ciddi derecede iyileşme meydana gelir. Ötelenecek piksel sayısını azaltmak amacıyla piksel seçme yöntemi kullanılacaktır. Bu yöntemde ileri varyanstan (FV) faydalanılacaktır.

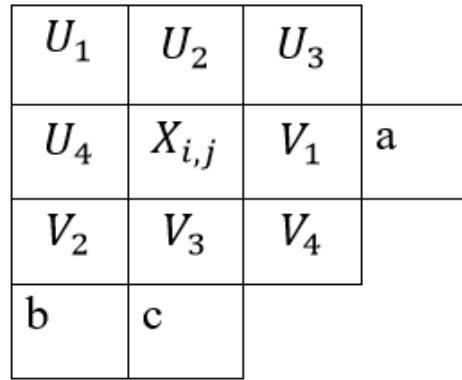
Görüntüdeki (i, j) konumundaki bir piksel için FV hesaplanırken, merkezi (i, j) olan komşuluktan faydalanılır ve standart sapma hesaplanır. Komşu piksellerden

hesaplanan ileri standart sapma aşağıda ifade edilmiştir. Buradaki komşuluk ilişkisi Şekil 3.2.'de görülmektedir.

$$FV = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (V_k - \bar{V})^2} \quad (3.5)$$

$$V_k = \{V_1, \dots, V_4\} \quad \bar{V} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 V_k$$

Şekil 3.2.'de, merkezi (i , j) olan piksel için Denklem (3.5)'de kullanacağımız $V_k = \{V_1, \dots, V_4\}$ değerleri belirlenir. \bar{V} komşu piksellerin ortalaması olarak ifade edilmektedir.

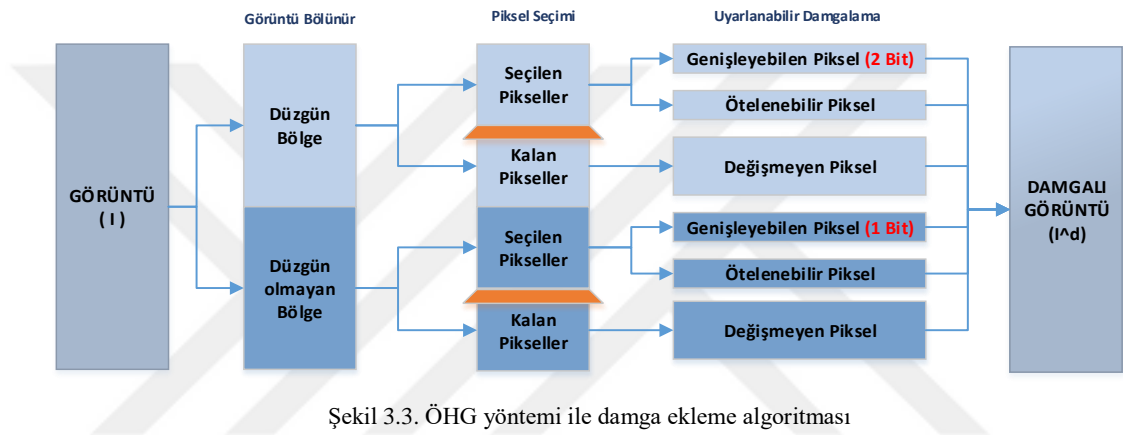


Şekil 3.2. Merkezi (i , j) olan pikselin komşulukları [25]

Piksel seçme özetlenecek olursa, tüm piksellerin FV'si hesaplanır. FV değeri, Δ_{tps} eşik değerinden küçük olan piksellere damga eklenir veya öteleme işlemi uygulanır. FV değeri, Δ_{tps} eşik değerinden büyük olan piksellerin değerinde değişiklik yapılmaz. Çift damgalama yapılan piksellerin belirlenmesi için damga ekleme veya damga çıkarmada hesaplanan FV'ler aynı olmalıdır. Damga eklemede kullanılan FV damga çıkarma esnasında da belirlenebildiğinden, damga çözücü hangi piksellerin seçildiğini belirleyebilmektedir.

Şekil 3.3.'de ÖHG yöntemi algoritmasını görmekteyiz. Burada görüntü ilk olarak yukarıda da bahsettiğimiz gibi düzgün ve düzgün olmayan bölge olarak ikiye ayrılır. Sonrasında kapasite parametresi ve piksel seçim eşik değeri belirlenir. Belirlenen bu

değerlere göre bu iki bölgede kendi içinde seçilen ve kalan pikseller şeklinde bölünür. Kalan pikseller hiçbir işleme tabi tutulmadan damgalı görüntüye kadar gidecekken, seçilen piksellere uyarlanabilir damgalama işlemi uygulanır ve düzgün bölgedeki piksellere 2 bit damgalama yapılır ve bir kısmı da gerekli koşullara bağlı şekilde ötelenir. Düzgün olmayan bölgedeki piksellere ise 1 bit damgalama yapılır ve aynı şekilde bir kısmı da gerekli koşullara bağlı şekilde ötelenir. Son adımda ise tüm işlemler birleştirilerek damgalı görüntü elde edilir. Burada bahsedilen kapasite parametreleri belirleme işlemleri detayları Kısım 3.2.4'te anlatılacaktır.



Şekil 3.3. ÖHG yöntemi ile damga ekleme algoritması

3.2.4. Kapasite parametresi belirleme

Bir görüntüye belirli miktarda bilgi eklenebilir. Eklenecek bu bilgi miktarının kapasite parametresi, t ile belirlenmektedir. Bu t değeri ile, genişletilebilen, ötelenebilen ve taşmaya neden olan piksel kümeleri sırasıyla $G(t)$, $O(t)$ ve $T(t)$ ile belirlensin ve $|\cdot|$ notasyonu bir kümedeki eleman sayısını gösterebilir. Buna göre bir görüntüye eklenebilecek maksimum bilgi miktarı (kapasite) $|G(t)|$ 'dir. Görüntü kapasitesine damga haricinde, damganın çözülmesi için gerekli ek bilgi ile damga ekleme sonucunda taşmaya neden olan piksellerin konumları eklenmektedir.

Görüntü kapasitemizi düzgün şekilde belirleyebilmek için genişletilebilen, ötelenebilen ve taşmaya neden olan pikselleri tespit etmek gerekir. Bunu tespit etmek için bu değerleri formülleştirelim.

Bir görüntüye eklenecek damga bitlerinin sayısını N_g , görüntüdeki damgayı çözmek için gerekli ek bilginin ikili tabanda gösterimdeki toplam bit sayısı N_{eb} ve görüntüde taşmaya neden olan piksellerin sayısı $\lceil \log_2(MN) \rceil \times |T(t)|$ 'dir. Buradan bir görüntüde genişletilebilen piksel sayısı,

$$|G(t)| \geq N_g + N_{eb} + (\lceil \log_2(MN) \rceil \times |T(t)|) \quad (3.6)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada t bu eşitliği sağlayan en küçük tamsayı seçilir. Çünkü bir görüntüye damga eklerken görüntüdeki bozunumu en aza indirmek ve az sayıda işlem gerçekleştirmek için damgamızı ekleyebileceğimiz en az sayıda piksele müdahale etmek isteriz.

Denklem (3.6)'daki $\log_2(MN)$ terimi $M \times N$ boyutundaki bir görüntünün bir pikselinin konumunu ikili tabanda göstermek için kullanılır.

Görüntü damgalamada, bozunum en az olacak şekilde damganın görüntüye nasıl dağıtılacağı önemli bir problemdir. Sayısal görüntüler de bu amaçla kapasitelerinin belirlenmesinde birçok analitik çözüm geliştirilmiştir.

Bir görüntü için belirlenen t değeri damgalama sonucunda görüntüde oluşan bozunumu belirlemekte ise t ne kadar küçük ise görüntüde oluşacak bozunum o kadar az olur. Bu durumu göz önüne aldığımızda, başlangıçta görüntü için kapasite parametresi mümkün en küçük değer olan 1 olarak kabul edilir. $t=1$ için görüntüye eklenebilecek damga miktarı belirlenir. Eğer görüntüye eklenebilecek bu damga miktarı, görüntüye eklenecek olan damga biti miktarından az ise t parametresi değeri 1 artırılır. Görüntü için yeni t değerinde damga miktarları yeniden hesaplanır. Görüntüye eklenmek istenen damga miktarı eklenebilecek damga miktarına eşit veya az olana kadar bu işlem devam eder. Görüntüye eklenmek istenen damga miktarı eklenebilecek damga miktarından eşit veya az olduğunda t parametremiz belirlenmiş olur. Yani görüntüye eklenmek istenen damga miktarına ulaşılmış olur ve t parametresini artırma işlemine son verilir. Aksi halde her seferinde t parametresi 1 artırılarak işleme devam edilir.

Genişleyen, ötelenen ve taşan pikselleri aşağıdaki şekilde belirlenmektedir.

Boyutları $M \times N$ olan orijinal görüntü I için $I = \{ (i,j) : 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N \}$ ise yardımcı görüntü J için $J = \{ (i,j) : 1 \leq i \leq M-1, 1 \leq j \leq N-1 \}$ olur. Burada J görüntüsü orijinal görüntünün öngörüsünü oluşturmada ve damga eklemede kullanılacaktır. İşlemlerimizde kullanacağımız öngörü hatası, orijinal görüntü ile görüntünün öngörüsü arasındaki farktır. Öngörü hatası $P_{ij} = I_{ij} - \bar{I}_{ij}$ şeklinde ifade edilir. $t \in \{1, \dots, 255\}$ olmak üzere bir görüntüdeki genişleyen, ötelenen ve taşan pikseller t parametresine göre aşağıdaki şekilde belirlenir.

Genişleyen pikseller : $G(t) = \{ (i,j) \in J : -t \leq P_{ij} < t, 0 \leq I_{ij} + P_{ij} \leq 255 \}$

Ötelenen pikseller:

$O(t) = \{ (i,j) \in J : P_{ij} \geq t, I_{ij} \leq 255 - t \} \cup \{ (i,j) \in J : P_{ij} \leq -t, I_{ij} \geq t \}$

Taşan pikseller: $T(t) = J - G(t) - O(t)$

Burada $G(t)$, iç bölgedeki taşma olmadan damga eklenebilecek genişleyen piksellerdir. $O(t)$ dış bölgedeki taşma olmaksızın ve damgalama işleminin de olmadığı ötelenebilecek piksellerdir. $T(t)$ ise genişleyemez, ötelenemez ve görüntüde taşan piksellerdir.

Yukarıdaki açıklanan bu durum ve koşullara göre t kapasite parametremiz belirlenmektedir.

3.2.5. Optimal uyarlanırlık ekleme eşik değerinin belirlenmesi

Uyarlanırlık ekleme eşik değeri, görüntünün içeriğine bağlı olduğu için verilen bir kapasite değerinde her görüntü farklı T_{uet} değerine sahiptir. Bir görüntü için genelde T_{uet} arttıkça görüntü kalitesi düşer. Bu durum göz önüne alınarak bir görüntü için optimum uyarlanırlık ekleme eşik değerinin bulunması için, görsel görüntü kalitesi (PSNR) T_{uet} 'nin fonksiyonu olarak $[0, r_{max}]$ aralığında çizdirilir. Bir görüntü için

uyarlanır ekleme eşik değerimiz, PSNR değerini en büyük yapan T_{uet} değeridir. Yapılan deneysel çalışmalarda $r_{max} = 15$ alınmıştır.

3.2.6. Damga ekleme

Şekil 3.3.'te damga eklemeye karşılık gelen blok diyagramı verilmiştir. Önerilen öngörü yöntemi kullanılarak görüntünün öngörüsü çıkarılır ve bununla birlikte görüntünün öngörü hatası hesaplanır. Pikseller Δ_{tae} eşik değer yardımı ile düzgün ve düzgün olmayan olarak iki gruba ayrılır. Verilen bir damga için uygun olan kapasite parametresi belirlenir. Sonrasında ise piksellerin FV değeri hesaplanır. Hesaplanan bu FV değerleri ile birlikte piksel seçme eşik değer Δ_{tps} yardımıyla damgalanacak ve ötelenecek pikseller belirlenir. Pikselin seçilip seçilmemesi durumuna göre uyarlanır damgalama gerçekleştirilir. Son olarak damga ile birlikte görüntüye ek bilgilerde eklenerek damgalı görüntü elde edilir.

Yukarıda özetlenen işlemler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır. Açıklamalarda görüntü dizisinin toplam boyutunun $M \times N$ olduğu, eklemek istenen damga biti sayısının N_g ve kapasite parametresinin T_{kp} ile gösterildiği varsayılmıştır.

U_1	U_2	U_3	
U_4	$X_{i,j}$	V_1	a
V_2	V_3	V_4	
b	c		

Şekil 3.4. $X_{i,j}$ merkezi pikseline ait FV değerini ve öngörü değerini bulurken kullanılan komşuluk ilişkileri

Boyutları $M \times N$ olan orijinal görüntü I için $I = \{ (i,j) : 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N \}$ ise yardımcı görüntü J için $J = \{ (i,j) : 1 \leq i \leq M-2, 1 \leq j \leq N-2 \}$ olacaktır.

Aşağıdaki işlem adımları, yardımcı görüntü için ilk pikselden başlanarak uygulanır ve damgalı görüntü elde edilir.

1. Orijinal görüntü I 'nin öngörüsü \bar{I} 'yı oluşturulur.

Aşağıdaki yöntem ile görüntünün öngörüsü hesaplanır.

$$\bar{I}_{i,j} = \begin{cases} V_1 & \text{eğer} & (d_v - d_h) > 80 & \text{ise} \\ \frac{(V_1 + \dot{X}_{i,j})}{2} & \text{eğer} & (d_v - d_h) \in (32, 80] & \text{ise} \\ \frac{(V_1 + 3\dot{X}_{i,j})}{4} & \text{eğer} & (d_v - d_h) \in (8, 32] & \text{ise} \\ X_{i,j} & \text{eğer} & (d_v - d_h) \in [-8, 8] & \text{ise} \\ \frac{(V_3 + 3\dot{X}_{i,j})}{4} & \text{eğer} & (d_v - d_h) \in [-32, -8] & \text{ise} \\ \frac{(V_1 + \dot{X}_{i,j})}{2} & \text{eğer} & (d_v - d_h) \in [-80, -32] & \text{ise} \\ V_3 & \text{eğer} & (d_v - d_h) < -80 & \text{ise} \end{cases}$$

$$d_v = |V_1 - V_4| - |V_2 - b| - |V_3 - c|,$$

$$d_h = |V_1 - a| - |V_2 - V_3| - |V_3 - V_4|,$$

$$\dot{X}_{i,j} = (V_1 + V_3)/2 + (V_2 - V_4)/4 \quad (3.7)$$

2. $h_{i,j} = I_{i,j} - \bar{I}_{i,j}$ ile verilen öngörü hatasını (ÖGH) belirlenir.
3. Denklem (3.5)'ten görüntü piksellerinin FV'si hesaplanır. Görüntü aşağıdaki gibi bölgelere ayrılır.

$$\text{Düzgün bölge} : J_f = \{ (i, j) \in J : FV_{i,j} < T_{uet} \}$$

$$\text{Düzgün olmayan bölge} : J_r = \{ (i, j) \in J : FV_{i,j} \geq T_{uet} \}$$

4. Kapasite parametresinin hesaplanması: $t' = \lfloor T_{kp}/3 \rfloor$ eşitliğini kullanarak görüntüdeki (I) bir pikseli aşağıda belirtilen gruplardan birine dahil edilir.

- J_f bölgesindeki genişletilebilen piksellerin grubu:

$$J_f : G_f(t) = \{(i,j) \in J_f : -t' \leq P_{i,j} < t' , \quad 0 \leq I_{i,j} + 3 \lfloor P_{i,j} \rfloor \leq 252\}$$

- J_f bölgesindeki ötelenebilen piksellerin grubu:

$$J_f : O_f(t) = \{(i,j) \in J_f : P_{i,j} \geq t' , I_{i,j} \leq 255 - 3t' \} \\ \cup \{(i,j) \in J_f : P_{i,j} < -t' , I_{i,j} \geq 3t' \}$$

- J_r bölgesindeki genişletilebilen piksellerin grubu:

$$J_r : G_r(t) = \{(i,j) \in J_r : -t \leq P_{i,j} < t , \quad 0 \leq I_{i,j} + \lfloor P_{i,j} \rfloor \leq 254\}$$

- J_r bölgesindeki ötelenebilen piksellerin grubu:

$$J_r : O_r(t) = \{(i,j) \in J_r : P_{i,j} \geq t , I_{i,j} \leq 255 - t \} \\ \cup \{(i,j) \in J_r : P_{i,j} < -t , I_{i,j} \geq t \}$$

- Taşma yaşanan pikseller grubu:

$$T(t) = (J_f - G_f(t) - O_f(t)) \cup (J_r - G_r(t) - O_r(t))$$

Görüntüdeki pikseller sırayla yukarıdaki şartlara göre incelenir ve herhangi bir piksel yukarıdaki gruplardan sadece birine dahil olabilir. Bu durumda yardımcı görüntümüz $J = G_f(t) \cup O_f(t) \cup G_r(t) \cup O_r(t) \cup T(t)$ 'dir.

Yukarıdaki işlemler incelendiğinde $G_f(t)$ kümesindeki pikseller 2 bit ile damgalanarak genişletilebilir ve taşma meydana gelmez. Aynı şekilde $G_r(t)$ kümesindeki pikseller 1 bit ile damgalanarak genişletilebilir ve taşma meydana gelmez. $O_f(t)$ ve $O_r(t)$ kümesindeki pikseller ise taşma olmadan ötelenebilmektedir. $T(t)$ kümesindeki pikseller ise ne genişletilebilmekte ne de ötelenebilmektedir.

$2|G_f(t)| + |G_r(t)|$ toplamı görüntüye eklenebilecek toplam bilgi miktarıdır. Görüntüye ait ek bilginin ikili tabanda gösteriminin bir dizide saklandığı varsayılırsa miktarı $60 + 18|O(t)|$ kadar olur. Eklenebilecek damga miktarı, toplam eklenecek bilgi miktarı ile ek bilgi miktarının toplamından büyük veya eşit olmalıdır.

$$2|G_f(t)| + |G_r(t)| \geq N_g + 60 + 18|T(t)| \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'deki şartı sağlayan en küçük T_{kp} değerimiz kapasite parametresi olarak alınır. $T_{kp} = 255$ iken Denklem (3.8) sağlanmıyorsa verilen damgayı görüntüye eklemek mümkün değildir.

5. Piksel eşik değerinin belirlenmesi: $G_f(t)$ ve $G_r(t)$ kümelerindeki düşük standart sapmalı genişletilebilen piksel gruplarını $\Delta_{tps} \in \{0,1, \dots, 255\}$ olmak üzere aşağıdaki şekilde tanımlayalım:

$$G_f(T_{kp}, s) = \{(i, j) \in G_f(T_{kp}) : K_{i,j} \leq s\} \quad (3.9)$$

$$G_r(T_{kp}, s) = \{(i, j) \in G_r(T_{kp}) : K_{i,j} \leq s\} \quad (3.10)$$

$$K_{i,j} = \max(FV_{i,j}, BV_{i,j}, L_{i,j}) \quad (3.11)$$

Denklem (3.11)'de belirtilen $K_{i,j}$ ifadesi $FV_{i,j}$, $BV_{i,j}$ ve $L_{i,j}$ ifadelerinden elde edilen maksimum olan değer olarak ifade edilmektedir. FV hesaplama denklemi Denklem (3.5)'de gösterilmişti. BV ve G için hesaplamalar aşağıdaki Denklem (3.12) ve Denklem (3.13)'de anlatılacaktır. Bu hesaplamalar için Şekil 3.4.'ten faydalanılmaktadır.

$$BV_{i,j} = \sqrt{1/4 \sum_{k=1}^4 (u_k - \bar{u})^2}, \quad \bar{u} = 1/4 \sum_{k=1}^4 u_k \quad (3.12)$$

$$L_{i,j} = |\bar{v} - \bar{u}| \quad (3.13)$$

$G_f(T_{kp}, s)$ grubundaki pikseller 2 bit, $G_r(T_{kp}, s)$ grubundaki pikseller 1 bit ile damgalandığından, belirlenen T_{kp} ve s değerleri için görüntüye eklenebilecek toplam bilgi miktarı:

$$2|G_f(t)| + |G_r(t)|$$

olacaktır. Bu toplam dikkate alınarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$2|G_f(T_{kp}, s)| + |G_r(T_{kp}, s)| \geq N_g + 60 + 18|T(T_{kp}, s)| \quad (3.14)$$

Denklem (3.14) şartını sağlayan en küçük s değeri, piksel seçme eşiği olarak kabul edilir. Piksel seçme eşiği $s = 255$ olması durumunda $G_f(T_{kp}, s)$ ve $G_r(T_{kp}, s)$ gruplarındaki tüm pikseller damgalamada kullanılır. Piksel seçme eşik değerini $s = 255$ seçerek ve bu gruptaki tüm pikselleri kullanarak aslında piksel seçme adımını ihmal etmiş oluruz.

6. Piksel seçme ve uyarlanır damgalama: BV ve L değerleri damgalanmış pikseller için hesaplanacaktır. Merkezi $I_{i,j}$ pikseli için (u) değerleri damgalı piksellerden, (v) değerleri damgalanmamış piksellerden elde edilecektir.

$$\{u_1^d = I_{i-1,j-1}^d, u_2^d = I_{i-1,j}^d, u_3^d = I_{i-1,j+1}^d, u_4^d = I_{i,j-1}^d\}$$

$$BV_{i,j}^d = \sqrt{1/4 \sum_{k=1}^4 (u_k - \bar{u})^2} \quad (3.15)$$

$$L_{i,j}^d = |\bar{v} - \bar{u}^d|$$

$$\bar{u}^d = (1/4) \sum_{k=1}^4 u_k^d \quad (3.16)$$

Aşağıdaki Denklem (3.17) koşulunu sağlayan durumlar için,

$$FV_{i,j} \leq T_{pst} \quad , \quad BV_{i,j}^d, L_{i,j}^d \leq T_{pst} + T_{kp} \quad (3.17)$$

- $(i, j) \in G_f(T_{kp})$ ise piksele 2 bit ($b \in \{0,1,2,3\}$) ekle.

$$I_{i,j}^d = I_{i,j} + 3[P_{i,j}] + b \quad (3.18)$$

- $(i, j) \in O_f(T_{kp})$ ise piksel değerini ötele.

$$I_{i,j}^d = \begin{cases} I_{i,j} + 3 \left\lfloor \frac{T_{kp}}{3} \right\rfloor & \text{eğer } P_{i,j} \geq \left\lfloor \frac{T_{kp}}{3} \right\rfloor \text{ ise} \\ I_{i,j} - 3 \left\lfloor \frac{T_{kp}}{3} \right\rfloor & \text{eğer } P_{i,j} \leq - \left\lfloor \frac{T_{kp}}{3} \right\rfloor \text{ ise} \end{cases} \quad (3.19)$$

- $(i, j) \in G_r(T_{kp})$ ise piksele 1 bit $b \in \{0,1\}$ ekle

$$I_{i,j}^d = I_{i,j} + [P_{i,j}] + b \quad (3.20)$$

- $(i, j) \in O_r(T_{kp})$ ise piksel değerini ötele.

$$I_{i,j}^d = \begin{cases} I_{i,j} + T_{kp} & \text{eğer } P_{i,j} \geq T_{kp} \\ I_{i,j} - T_{kp} & \text{eğer } P_{i,j} < -T_{kp} \end{cases} \quad (3.21)$$

Denklem (3.17) sağlanmadığında,

$I_{i,j}^d = I_{i,j}$ 'dir. Yani piksel değerleri orijinal görüntüdeki değerleri ile aynı değeri alır.

7. Ek bilgilerin eklenmesi: Görüntünün ilk pikselinden itibaren $60+18|T(t)|$ tane piksel kadar ilerleyip bu piksellerin en düşük anlamlı bitlerini S_{EDB} dizisinde sakla. S_{EDB} dizisindeki bitleri, adım 6'da damgalamanın sona erdiği pikselden sonraki piksellere yine adım 6'daki gibi ekle. Sonrasında ek bilgi dizisinin bitlerini, görüntünün ilk pikselinden itibaren $60+18|T(t)|$ kadar pikselin en düşük anlamlı bitleri ile değiştir. Bu aşamanın sonucunda damgalanmış görüntü elde edilmiş olur.

3.2.7. Ek bilginin hazırlanması

Tartışılan yöntemde ek bilgiler, damga ekleme işlemleri sırasında damga ile birlikte görüntüye eklenir. Damganın görüntüden en iyi şekilde çıkarılmasında çok büyük bir faktör olan ek bilgiler, damga çıkarma esnasında damgalı görüntüden geri oluşturulur. Bu nedenle orijinal görüntünün belirli bir kısmı ek bilgileri saklamak amacıyla kullanılmaktadır.

Tablo 3.1. Ek bilgileri saklayabilmek için gerekli bit sayısı

T_{kp}	T_{pst}	T_{uet}	Son konum	Taşan Pksel Sayısı $T(t)$	Taşan Pksellerin Konumu
8 bit	8 bit	8 bit	18 bit	18 bit	$18 * T(t) $ bit

Bir görüntü için ek bilgiyi oluşturan bileşenler Tablo 3.1.'deki gibidir. Görüntünün kapasite parametresi T_{kp} , piksel seçme eşik değeri T_{pst} , uyarlanabilir damgalama eşik değeri T_{uet} , görüntüye ek bilginin eklenmeye başladığı piksel konumu, taşmaya neden olan piksellerin sayısı ve konumları eklenmektedir. Toplamda eklenecek ek bilgi sayısı $8+8+8+18+18+18|T(T_{kp})|$ kadardır.

T_{pst} , T_{uet} ve T_{kp} , her biri $[0,255]$ aralığında değer aldıklarından 8 bit ile temsil edilir. Görüntü boyutu $M \times N$ olmak üzere herhangi bir pikselin konumu $\log_2(MN)$ bit ile temsil edilir. Bu durum göz önüne alındığında son konumu saklamak için gerekli bit uzunluğu $\log_2(MN)$ bitdir. Taşmaya neden olan piksel sayısı $T(T_{kp})$, $\log_2(MN)$ kadar bit ile temsil edilir. Taşmaya sebep olan piksel konumlarını tutmak için $T(T_{kp}) \times \log_2(MN)$ kadar bit değeri gereklidir.

3.2.8. Damga çıkartımı

Damgalı bir görüntüden damga çıkarma işleminin düzgün şekilde gerçekleştirilebilmesi için damga eklemede kullanılan piksellerin öngörülerinin aynı şekilde geri elde edilebilmesi gereklidir. Damga eklerken ek bilgi olarak eklediğimiz

son konum damga çıkarmada önemli bir yere sahiptir. Çünkü damga çıkartma işlemi son damganın eklendiği pikselden ilk piksele doğru gerçekleştirilir.

Damga çıkarmada kullanılan işlemler aşağıdaki adımlarda gösterilmektedir. Bu adımlar son damganın eklendiği pikselden geriye doğru uygulanır.

1. Ek bilgilerin elde edilmesi: Damga çıkarma işleminde ilk olarak damgalı görüntümüzün ($I_{i,j}^d$) ilk $60+18|T(t)|$ tane pikselinin en düşük anlamlı bitlerinden ek bilgiler elde edilecektir. Bu ek bilgilerimiz, kapasite parametresi T_{kp} , piksel seçme eşik değeri T_{pst} , uyarlanabilir damgalama eşik değeri T_{uet} , görüntüye ek bilginin eklenmeye başladığı piksel konumu, taşmaya neden olan piksellerin sayısı ve taşmaya neden olan piksellerin konumlarıdır.
2. Damgalı görüntüde damgalı piksellerin öngörüsü ($\bar{I}_{i,j}$) her piksel için adım adım hesaplanır.
3. $P_{i,j}^d = I_{i,j}^d - \bar{I}_{i,j}$ eşitliğinden öngörü hatası hesaplanır.
4. Damgalı görüntüde merkezi pikselin komşu damgalanmış piksellerinden $BV_{i,j}^d$ değerleri, komşu damgalanmamış piksellerinden $FV_{i,j}$ ve $L_{i,j}^d$ değerleri hesaplanır.
5. Aşağıda verilen adımları son damgalanan pikselden itibaren damgalı görüntüye uygulayarak, damga bitleri ve orijinal görüntü oluşturulur. Damgalı görüntüden çıkardığımız damga bitleri ile en düşük anlamlı bitleri (EDB) belirle.

$$T'_{kp} = \lfloor T_{kp}/3 \rfloor \text{ için,}$$

a. $FV_{i,j} \leq T_{pst}$, $BV_{i,j}^d, L_{i,j}^d \leq T_{pst} + T_{kp}$ ve $(i,j) \notin \{T(k, T_{kp})\}$ şartını sağlayan durumlarda

- $FV_{i,j} < T_{uet}$, $P_{i,j}^d \in [-4T'_{kp}, 4T'_{kp})$ şartını sağlayan durumlarda damgalı pikselden 2 bit çıkartılacaktır. Eklenen damga,

$$b = \lfloor P_{i,j}^d \rfloor - 4 \lfloor P_{i,j}^d / 4 \rfloor \text{ eşitliğinden çıkarılır. Orijinal piksel değeri ise,} \quad (3.22)$$

$$I_{i,j} = I_{i,j}^d - 3 \lfloor P_{i,j}^d / 4 \rfloor - b \text{ şeklinde hesaplanır.} \quad (3.23)$$

- $FV_{i,j} < T_{uet}$, $P_{i,j}^d \in (-\infty, -4T'_{kp}) \cup [4T'_{kp}, \infty)$ şartını sağlayan durumlarda damga eklenmemiş piksel değerleri ötelenmiştir. Orijinal piksel değeri,

$$I_{i,j}^d = \begin{cases} I_{i,j}^d - 3T'_{kp} & \text{eğer } P_{i,j}^d \geq 4T'_{kp} \text{ ise} \\ I_{i,j}^d + 3T'_{kp} & \text{eğer } P_{i,j}^d < -4T'_{kp} \text{ ise} \end{cases} \text{ şeklinde hesaplanır.} \quad (3.24)$$

- $FV_{i,j} \geq T_{uet}$, $P_{i,j}^d \in [-2T_{kp}, 2T_{kp})$ şartını sağlayan durumlarda damgalı pikselden 1 bit çıkarılacaktır. Eklenen damga,

$$b = \lfloor P_{i,j}^d \rfloor - 2 \lfloor P_{i,j}^d / 2 \rfloor \text{ ile çıkartılır. Orijinal piksel değeri,} \quad (3.25)$$

$$I_{i,j} = I_{i,j}^d - \lfloor P_{i,j}^d / 2 \rfloor - b \text{ şeklinde hesaplanır.} \quad (3.26)$$

- $FV_{i,j} \geq T_{uet}$, $P_{i,j}^d \in (-\infty, -2T_{kp}) \cup [2T_{kp}, \infty)$ şartını sağlayan durumlarda damga eklenmemiş ve piksel değeri ötelenmiştir. Orijinal piksel değeri,

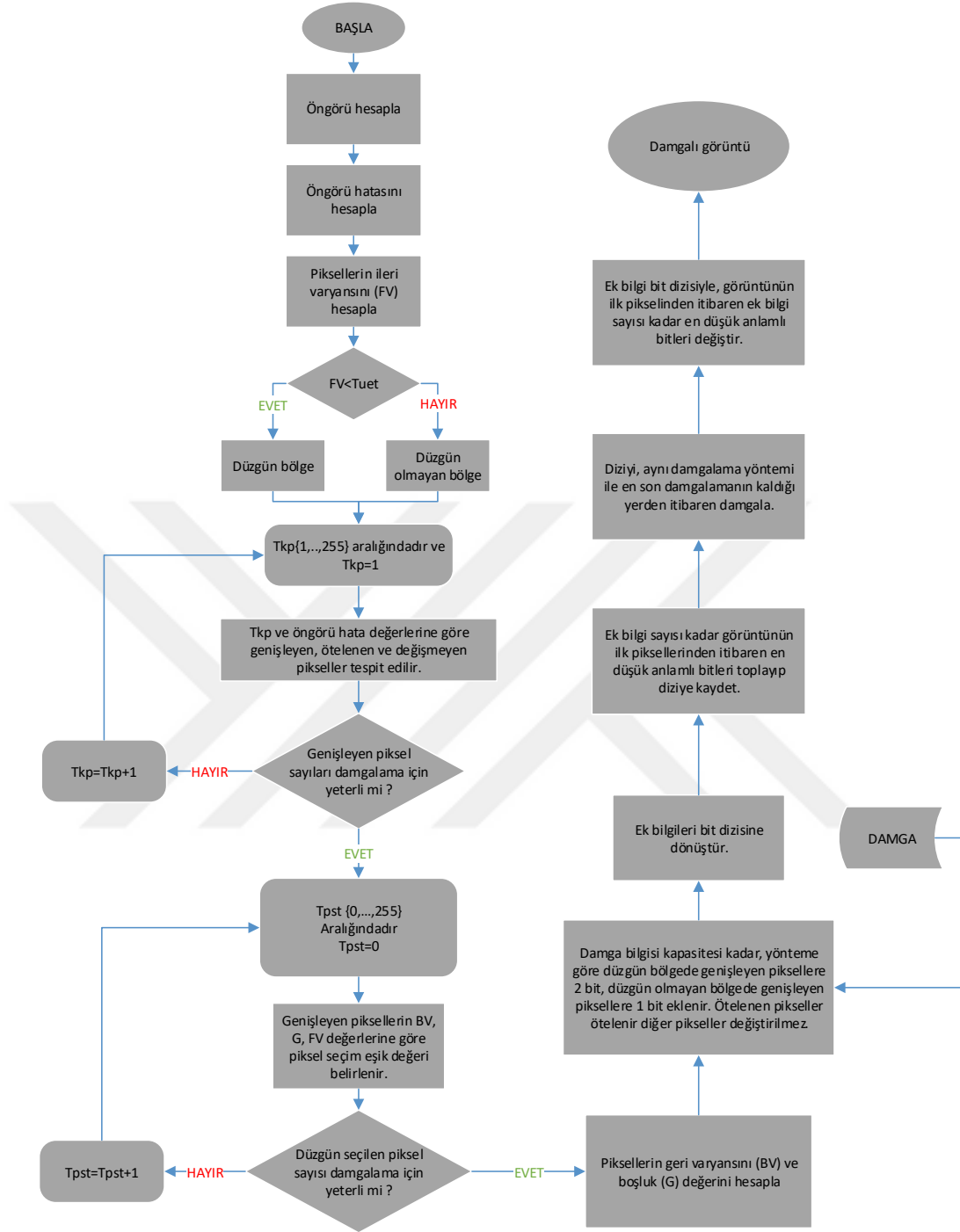
$$I_{i,j}^d = \begin{cases} I_{i,j}^d - T_{kp} & \text{eğer } P_{i,j}^d \geq 2T_{kp} \text{ ise} \\ I_{i,j}^d + T_{kp} & \text{eğer } P_{i,j}^d < -2T_{kp} \text{ ise} \end{cases} \text{ şeklinde hesaplanır.} \quad (3.27)$$

b. Yukarıdaki şartların hiç biri sağlanmaması durumunda orijinal piksel değeri damgalı görüntüdeki piksel değerine eşit olacaktır.

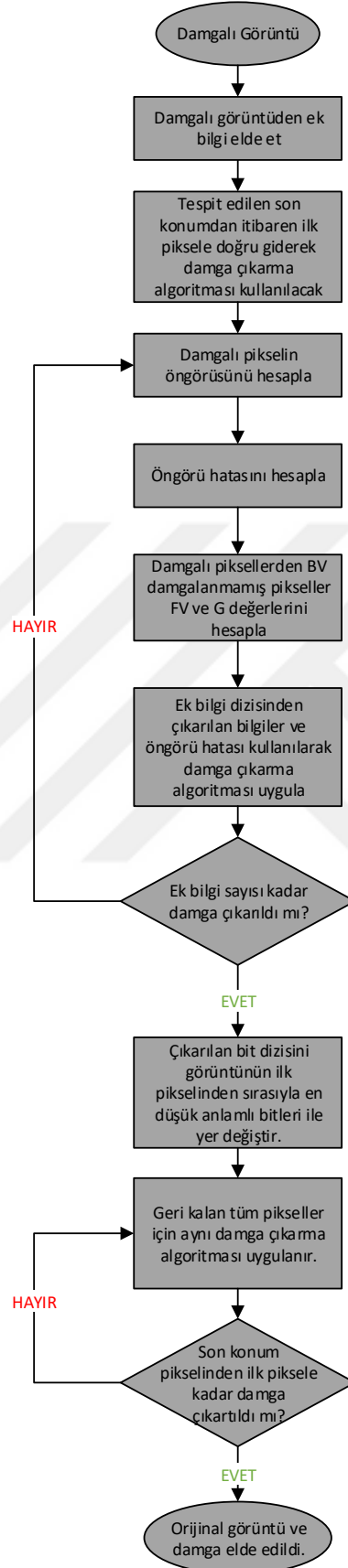
$$I_{i,j} = I_{i,j}^d \quad (3.28)$$

Damga ekleme ve çıkartma blok diagramları Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.'da gösterilmektedir.





Şekil 3.5. Uyarlanıır damgalama ve piksel seçimi blok diagramı



Şekil 3.6. Damga çıkartma blok diagramı

BÖLÜM 4. ARADEĞERLEME HATASINA DAYALI TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA

4.1. Giriş

Deney sonuçları veya benzer çalışmalar için doğru bilinen değerleri kullanarak, aralarda bilinmeyen noktadaki değerleri yaklaşık olarak belirleme işlemine aradeğerleme (interpolasyon) denir. İnterpolasyon, bilinmeyen değerler bilinen değerlerin arasında bir noktada ise bilinen noktalar kullanarak bilinmeyen değerlerin bulunmasıdır [33, 35].

4.2. Altyapı

Bu bölümde aradeğerleme hatası genişletilmesine dayalı damgalama yöntemi tartışılacaktır. Bölüm 3'teki yöntemde tahmin görüntüsü, öngörü algoritması ile elde edilmektedir. Bölüm 3'te damgalama kısmında damgalama algoritmasına ek olarak uyarlanabilir damgalama ve piksel seçimi teknikleri uygulanmaktadır. Bu bölümde incelenecek olan yöntemde ise damgalamada kullanılan tahmin görüntüsü aradeğerleme (interpolasyon) tekniği ile elde edilmektedir. Yöntem pikseller arası ilintiden daha etkin bir şekilde faydalanmaktadır. Aşağıda bu durum Şekil 4.1. ile birlikte anlatılmaktadır. Ayrıca yöntem düşük miktarda ek bilgiye ihtiyaç duyduğundan yüksek kapasiteye sahiptir.

4.2.1. Katkı interpolasyonu - hata genişlemesi

Esasen, önerilen interpolasyon tersinir görüntü damgalama veri yerleştirme yaklaşımı, yani aradeğerleme hata genişlemesi, FG'nin bir türüdür. Fakat FG yaklaşımlarının çoğundan iki önemli açıdan farklıdır [12, 16]:

1. Verileri gömmek için, piksel farkı veya tahmin hatası yerine aradeğerleme hatası kullanılır.
2. Burada, öteleme işlemi yerine ekleme yöntemi ile aradeğerleme hatası olan fark genişletilir.

İlk olarak, piksellerin interpolasyonu, hesaplaması yapılan pikseli çevreleyen piksellerden bir piksel değerini tahmin ederek çalışan aradeğerleme tekniği kullanılarak hesaplanır. Aradeğerleme hatası aşağıdaki gibi elde edilir.

$$h = x - \bar{x} \quad (4.1)$$

Burada \bar{x} , x piksellerinin interpolasyon değerleridir. LM ve RM, interpolasyon-hatalar histogramının en yüksek iki noktasına karşılık gelen değerleri belirtsin. LM ve RM aşağıdaki şekilde formüle edilir.

$$\begin{cases} LM = \arg \max_{h \in H} hist(h) \\ RM = \arg \max_{h \in H - \{LM\}} hist(h) \end{cases} \quad (4.2)$$

Burada $hist(h)$, interpolasyon hatası eşit olduğu durumda h ve H interpolasyon hataları grubunu belirtir. Genellemeden $LM < RM$ şeklinde bir varsayım yapalım.

1. Sol interpolasyon hatası (LH): interpolasyon-hata h , $h \leq LM$ 'yi karşılar.
2. Sağ interpolasyon hatası (RM): interpolasyon-hata $h \geq RM$ 'yi karşılar.

Katkı interpolasyonu-hata genişlemesi şu şekilde formüle edilir:

$$\bar{h} = \begin{cases} h + sign(h) * b , & h = LM \text{ veya } RM \\ h + sign(h) * 1 , & h \in (LN, LM) \cup (RM, RN) \\ h, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.3)$$

Burada \bar{h} genişletilmiş interpolasyon hatasıdır, b eklenecek damga biti ve $sign(.)$ aşağıdaki gibi tanımlanan bir işaret fonksiyonudur.

$$\text{sign}(h) = \begin{cases} 1, & h \in RE \\ -1, & h \in LE \end{cases} \quad (4.4)$$

Denklem (4.3)'te, LN ve RN parametreleri aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\begin{cases} LN = \arg \min_{h \in LH} \text{hist}(h) \\ RN = \arg \min_{h \in RH} \text{hist}(h) \end{cases} \quad (4.5)$$

Genellikle, LM çok küçük bir tamsayıdır ve çoğu durumlarda 0 değerini alır. LN, daha küçük bir tam sayıdır ama interpolasyon hata histogramında değeri yoktur. Benzer şekilde, çoğu durumda, RM 1'e eşittir ve RN, $h = RN$ 'yi sağlayan hiçbir interpolasyon hatası olmaksızın daha büyük bir tamsayıdır. İnterpolasyon hatalarının genişletilmesinden sonra, filigran pikselleri (\bar{x}) hesaplanır.

$$\bar{x} = \bar{x} + \bar{h} \quad (4.6)$$

Çıkarma işlemi sırasında, aynı interpolasyon algoritması ile, aynı interpolasyon değerlerini ve \bar{x} 'e karşılık gelen interpolasyon hatalarını (\bar{h}),

$$\bar{h} = \bar{x} - \bar{x} \quad (4.7)$$

eşitliğinden hesaplarız. Bununla birlikte LM, LN, RM ve RN değerleri bilindiği zaman, gömülü veriler aşağıdaki şekilde çıkarılabilir.

$$b = \begin{cases} 0, & \bar{h} = LM \text{ veya } RM \\ 1, & \bar{h} = LM - 1 \text{ veya } RM + 1 \end{cases} \quad (4.8)$$

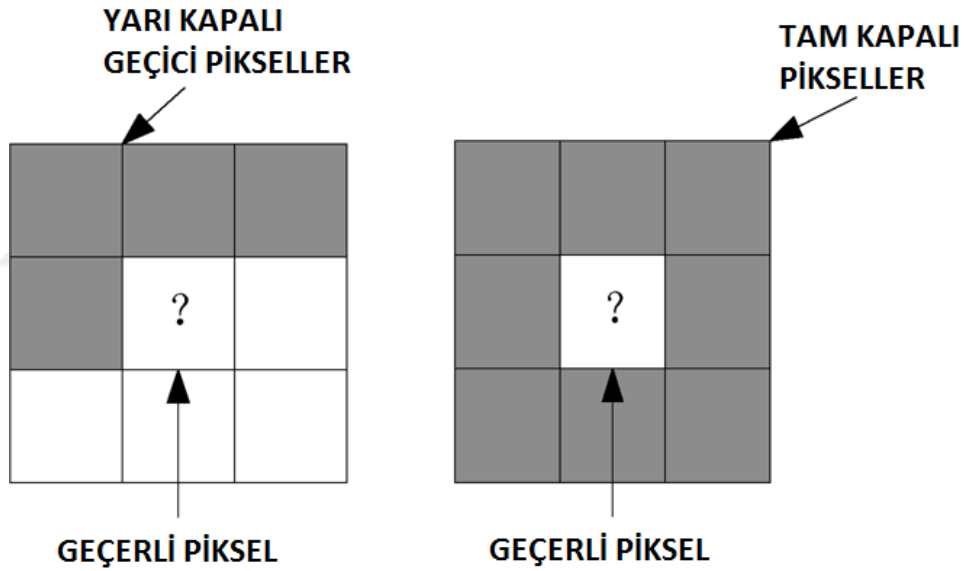
Ardından, katkı interpolasyon-hata genişletme işleminin ters işlevi orijinal interpolasyon hatalarını düzeltmek için uygulanır.

$$h = \begin{cases} \bar{h} - \text{sign}(\bar{h}) * b, & \bar{h} \in [LM - 1, LM] \cup [RM, RM + 1] \\ \bar{h} - \text{sign}(\bar{h}) * 1, & \bar{h} \in [LN, LM - 1] \cup [RM + 1, RN] \\ \bar{h}, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.9)$$

Son olarak, orijinal pikselleri şu yollarla geri yükleyebiliriz:

$$x = \bar{x} + h \quad (4.10)$$

Önceki FG yöntemleri kaynak [12] - [16] ile karşılaştırıldığında, katkı interpolasyon-hata genişlemesi üç yönden avantajlıdır: Birincisi, her bir pikseli en fazla 1 değiştirdiği için katma genişlemesi bozulması daha küçüktür.



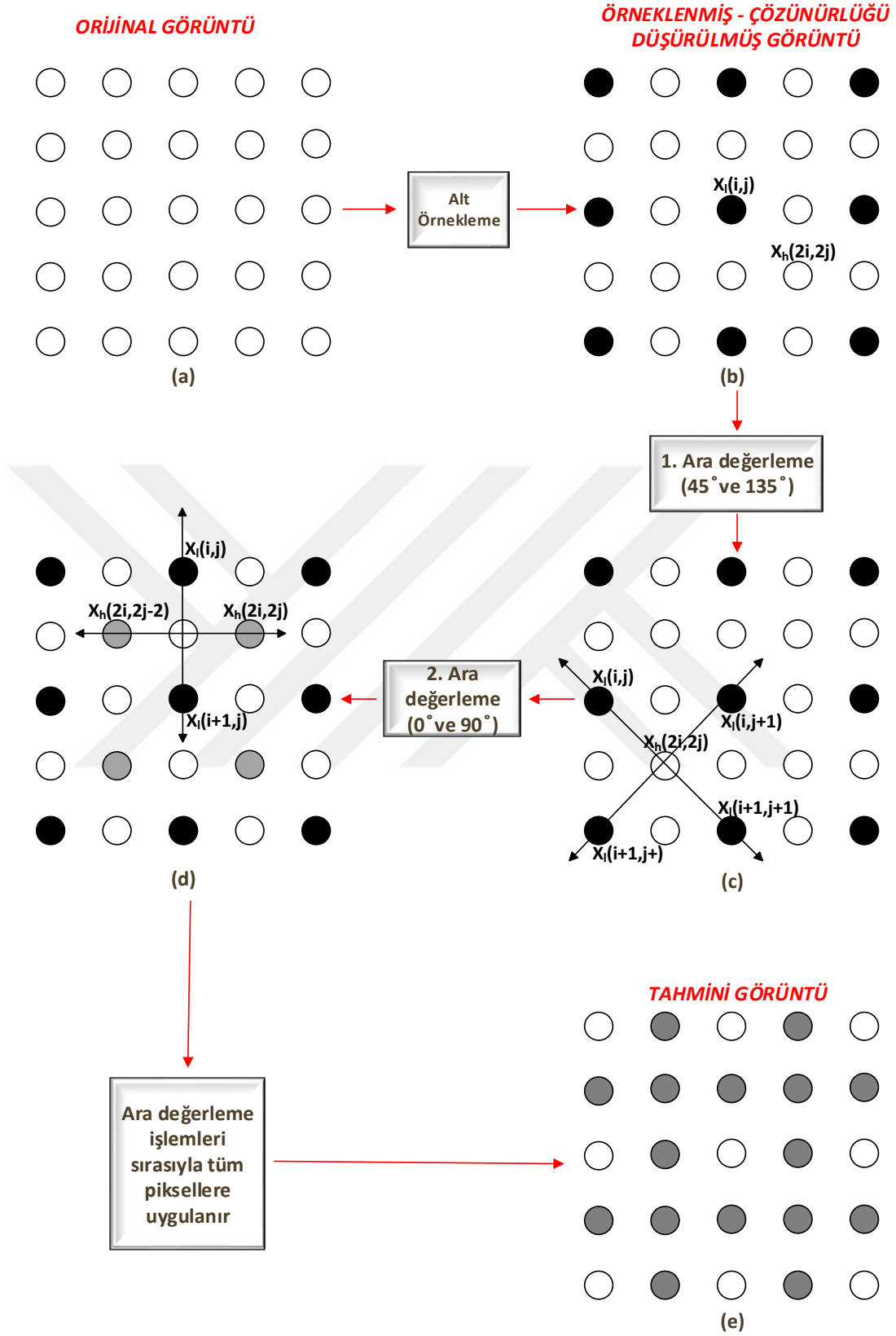
Şekil 4.1. Etrafı yarı kapalı geçici pikselin ve tam kapalı pikselin yorumlanması [33].

İkincisi, LM, LN, RM ve RN ile ayırt edilebildiği için, genişletilmiş interpolasyon hataları ile genişletilmemiş olanlar arasındaki konum haritasına ihtiyaç duyulmaz. Son olarak, interpolasyon hataları tahmini hatalara göre daha da genişletilebilir.

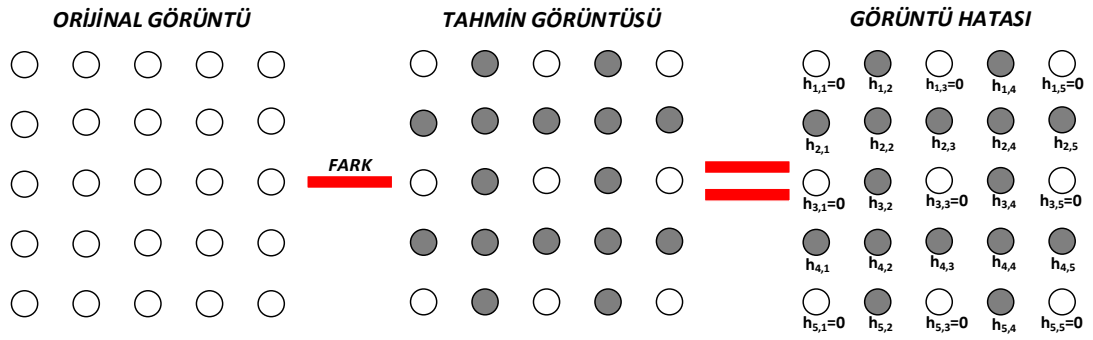
4.2.2. İnterpolasyon hatası

Geçmişteki geleneksel metotlardan farklı olarak, damga verilerini eklemek için piksel değeri ile interpolasyon değeri arasındaki fark olan interpolasyon hatasını kullanırız. İnterpolasyon hatasını, tahmin hatasına daha iyi bir alternatif olarak göstermenin birkaç nedeni deneysel sonuçlarımızla birlikte Bölüm 5'te açıklanacaktır.

Aşağıda interpolasyon değerlerini ve interpolasyon hatalarını elde etmek için uygun bir görüntü interpolasyon algoritması anlatılmaktadır. Görüntü interpolasyonu, düşük çözünürlüklü eşdeğerinden yüksek çözünürlüklü bir görüntü üretme işlemidir. Tıbbi görüntüleme, uzaktan algılama ve dijital fotoğraflardaki uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Daha iyi anlaşılması için, Zhang ve ark.'ın basitleştirilmiş interpolasyon algoritmasından faydalanılmaktadır [34].



Şekil 4.2. (a) Orijinal görüntü, (b),(c) Yüksek çözünürlüklü x_h görüntüsünden, düşük çözünürlüklü x_1 görüntüsünü oluşturma. (d) Yüksek çözünürlüklü kalan örneklerin interpolasyonu. (e) Örnek Piksellerin interpolasyonu



Şekil 4.3. Orijinal görüntü ile tahmini görüntü arasındaki fark ile aradeğerleme hatasını elde etme.

Şekil 4.3.'te görüntü hatasının nasıl elde edildiği gösterilmektedir. Şekil 4.2.'de yapılan işlemler ile elde edilen tahmin görüntüsü orijinal görüntüden çıkartılarak işlemlerde kullandığımız piksellerin hatası elde edilmiştir. Tüm hataları görüntü hatası şeklinde görmekteyiz.

Düşük çözünürlüklü bir görüntü (x_l), ilişkili bir yüksek çözünürlüklü x_h 'den doğrudan $x_l(i, j) = x_h(2i - 1, 2j - 1)$, $1 \leq i \leq N$, $1 \leq j \leq M$ ile örneklenmektedir. Şekil 4.2.(b)'de siyah noktalar x_l 'in piksellerini, beyaz noktalar x_h 'nin eksik piksellerini temsil etmektedir. Burada interpolasyon, boyutu $N \times M$ olan, düşük çözünürlüklü x_l 'deki pikselden boyutu $2N \times 2M$ olan yüksek çözünürlüklü x_h 'deki eksik pikselleri tahmin etmeyi amaçlar.

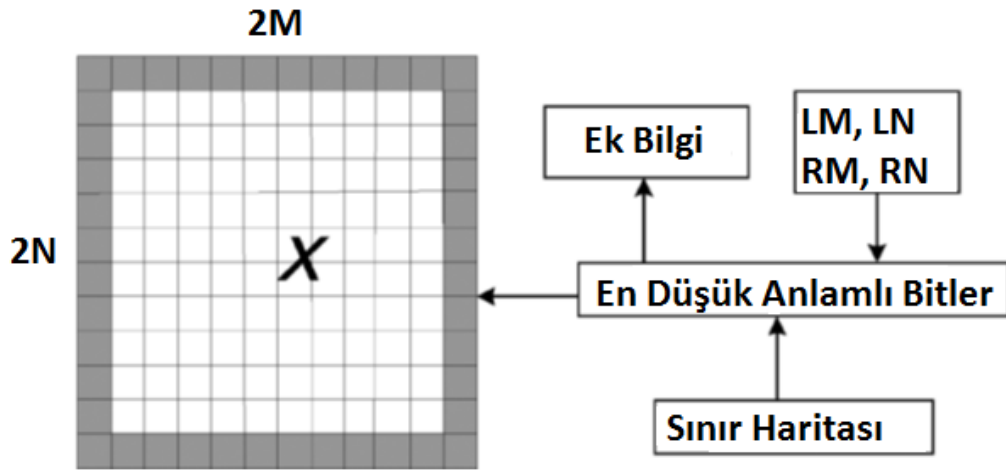
İnterpolasyonun ana konusu, eksik pikseller ve komşu pikseller arasındaki korelasyonun nasıl çıkarılıp nasıl kullanılacağıdır. Tartışılan interpolasyon algoritması ile, her eksik pikselin komşu pikselleri, birbirine dik olan iki yönlü alt kümeye ayrılır. Her bir alt küme için, yönlü bir interpolasyon yapılır ve ardından x_h 'yi tahmin etmek için iki interpolasyonlu değeri en uygun ağırlık çifti ile birleştirilmektedir. Yüksek çözünürlüklü x_h iki adımda yeniden oluşturulur. Öncelikle, dört düşük çözünürlüklü pikselle çevrili merkezi konumlarda bulunan $x_h(2i, 2j)$ eksik pikselleri interpolasyona tabi tutulur. Sonrasında diğer eksik pikseller $x_h(2i - 1, 2j)$ ve $x_h(2i, 2j - 1)$, önceden kurtarılan piksel $x_h(2i, 2j)$ yardımı ile interpolasyona tabi tutulmaktadır.

Şekil 4.2.(c)'ye bakıldığında, iki dikey doğrultuda eksik yüksek çözünürlüklü piksel $x_h(2i, 2j)$ 'ye 45° köşegen ve 135° köşegen piksel değerlerine göre aradeğerleme (interpolasyon) işlemi yapılır. $\bar{x}_{45}(2i, 2j)$ ve $\bar{x}_{135}(2i, 2j)$ ile gösterilen bu iki yöndeki interpolasyon değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\begin{cases} \bar{x}_{45} = (x_l(i, j + 1) + x_l(i + 1, j))/2 \\ \bar{x}_{135} = (x_l(i, j) + x_l(i + 1, j + 1))/2 \end{cases} \quad (4.11)$$

Burada interpolasyon hataları olan h_{45} ve h_{135} değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{cases} h_{45}(2i, 2j) = \bar{x}_{45}(2i, 2j) - x_h(2i, 2j) \\ h_{135}(2i, 2j) = \bar{x}_{135}(2i, 2j) - x_h(2i, 2j) \end{cases} \quad (4.12)$$



Şekil 4.4. Ek bilgilerin en düşük anlamlı bitlerle değiştirilmesi [33].

x_h 'nin doğrusal minimum ortalama kare hata tahminini hesaplamak yerine, x_h 'den \bar{x}_h 'yi tahmin etmek için optimum ağırlık çifti seçilir. Bunun sebebi ağırlıklı ortalama stratejisi, karmaşıklığı önemli ölçüde düşürmektedir.

$$\begin{cases} \bar{x}_h = w_{45} \cdot \bar{x}_{45} + w_{135} \cdot \bar{x}_{135} \\ w_{45} + w_{135} = 1 \end{cases} \quad (4.13)$$

w_{45} ve w_{135} ağırlık değerleri, x_h 'in ortalama kare hatasını en aza indirmek için belirlenir.

$$\{w_{45}, w_{135}\} = \arg_{w_{45}+w_{135}=1} \min E[(\bar{x}_h - x_h)^2] \quad (4.14)$$

$$w_{45} = \frac{\sigma(h_{135})}{\sigma(h_{45})+\sigma(h_{135})}, \quad w_{135} = 1 - w_{45} \quad (4.15)$$

Burada $\sigma(h_{45})$ ve $\sigma(h_{135})$ değerleri sırasıyla h_{45} ve h_{135} değerlerinin varyans tahminidir. Ağırlıklandırma yönteminin nasıl çalıştığını Denklem (4.15)'ten görmekteyiz. Örneğin, 45° köşegen yönde veya yakınında bir kenar için, $\sigma(h_{135})$, $\sigma(h_{45})$ 'ten daha yüksektir, böylece w_{135} , w_{45} 'den daha düşük olur. Sonuç olarak \bar{x}_{135} , \bar{x}_h üzerinde \bar{x}_{45} 'e göre daha az etkiye sahiptir. Aynı şekilde bunun tersi durumda geçerlidir.

Şekil 4.2.(c)'ye bakıldığında, $x_h(2i, 2j)$ 'nin ortalama değeri, u ile gösterilir ve $x_h(2i, 2j)$ etrafında bulunan düşük çözünürlüklü pikseller kullanılarak tahmin edilir.

Hesaplamanın karmaşıklığını ve piksellerin tutarlılığını dengelemek için u değerini şu şekilde hesaplarız:

$$u = \frac{(x_l(i,j+1)+x_l(i+1,j))}{4} + \frac{(x_l(i,j)+x_l(i+1,j+1))}{4} \quad (4.16)$$

İnterpolasyon hatalarının varyans tahminlerini ise aşağıdaki şekilde hesaplarız.

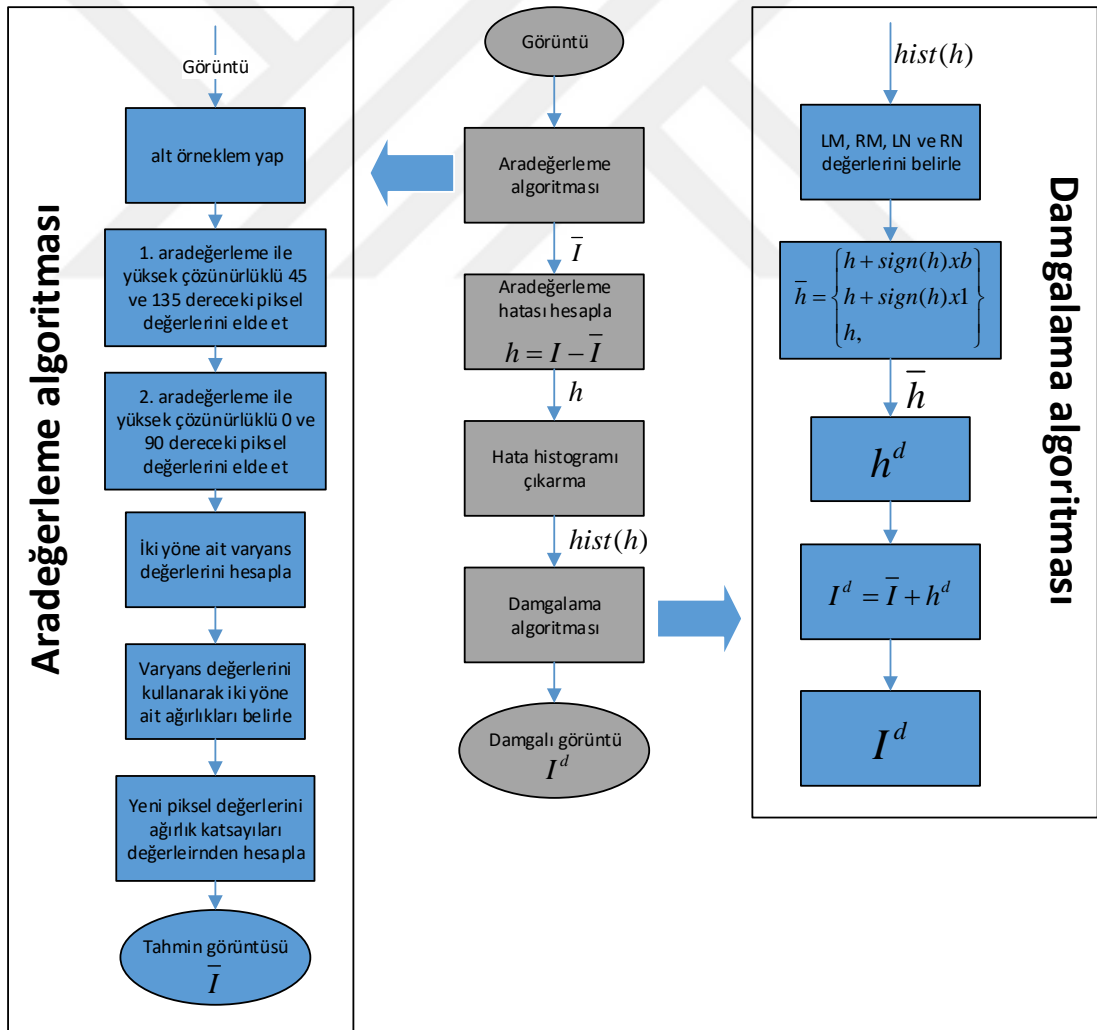
$$\begin{cases} \sigma(h_{45}) = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 (S_{45}(k) - u)^2 \\ \sigma(h_{135}) = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 (S_{135}(k) - u)^2 \end{cases} \quad (4.17)$$

$$\begin{cases} S_{45} = \{x_l(i, j + 1), \bar{x}_{45}, x_l(i + 1, j)\} \\ S_{135} = \{x_l(i, j), \bar{x}_{135}, x_l(i + 1, j + 1)\} \end{cases} \quad (4.18)$$

Bilinmeyen yüksek çözünürlüklü piksel $x_h(2i, 2j)$ 'in tahminlerini elde etmek için ilk olarak Denklem (4.11) - (4.18) kullanılır. $x_h(2i, 2j)$ 'in tahmininden sonra kalan piksel değerleri $x_h(2i - 1, 2j)$ ve $x_h(2i, 2j - 1)$ aynı şekilde tahmin edilir.

Şekil 4.2.(d)'ye bakıldığında, siyah noktalar düşük çözünürlüklü pikselleri, gri noktalar ilk basamaktaki tahmini pikselleri, beyaz noktalar ise interpolasyon yapılacak pikselleri temsil etmektedir. Buradaki işlemler birinci aşamadaki ile aynıdır sadece yönler 0° ve 90° olmuştur. Bu işlemler sırasıyla tüm piksellere uygulanır.

Yukarıda anlatılan tüm bu aradeğerleme işlemleri sonrası bazı sorunlar ile karşılaşmaktadır. Şekil 4.2.(b)'de gösterildiği gibi, görüntüyü yeniden oluşturmak için kullanılan piksellerin çeyreği, verileri gömmek için kullanılamaz. Dolayısıyla, algoritmanın kapasitesi kısıtlıdır, bu da damgalamada önemli bir sorundur. Aradeğerlemeye dayalı TD blok diagramı Şekil 4.5.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Aradeğerlemeye dayalı TD blok diagram

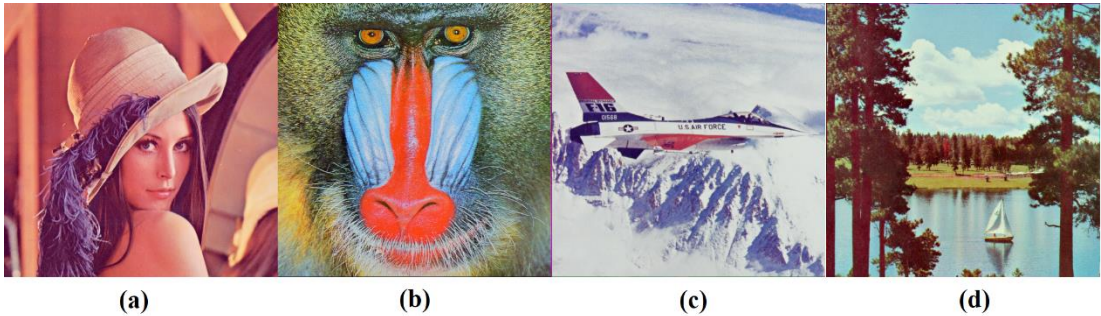
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, öngörü hatalarının uyarlanırlar genişletilmesine dayalı ve aradeğerlemeye dayalı TD algoritmaları karşılaştırılmıştır [25, 33]. Uyarlanırlar genişletme, aradeğerleme ve piksel seçme teknikleri tezimizde önerilen yöntemlerde kilit noktalardır.

Öngörü hatasının uyarlanırlar genişletilmesine dayalı TD yöntemi ve piksel seçme tekniği Bölüm 3'te tartışılmıştır. Orijinal veriyi geri elde etmek istediğimiz uygulamalarda kullanılan TD yöntemlerinde, damga eklerken veya çıkarılırken verinin bozulma oranı önemli bir kısıttır. Bu bozulmayı en aza indirmek için uyarlanırlar (adaptif) damgalama tekniği, tezimizde çalışılmıştır. Öngörü hatasından bağımsız olarak tüm blokları aynı şekilde damgalayan mevcut TD yöntemlerinin aksine uyarlanırlar damgalama, düşük ve yüksek öngörü hatasına sahip blokları farklı şekilde damgalamaktadır. Yüksek öngörü hatasına sahip olan pikseller damgalamada kullanılmayarak damgalama sonucu orijinal görüntüde oluşan bozunumu azaltmıştır. Ayrıca Bölüm 3'te uyarlanırlar damgalama ile birlikte piksel seçme tekniğinin kullanıldığını görmekteyiz. Önceki damgalama işlemlerinde damgalanan pikseller haricindeki pikseller öteleme işlemine tabi tutulur. Yapılan öteleme işlemi görüntüde bozulmalar meydana getirerek görüntü kalitesini düşürmektedir. Piksel seçme tekniği ile tüm pikseller ötelenmemektedir. Ötelenmesi gerekli ve yeterli olan pikseller belirlenerek görüntü haritası oluşturulur ve yerleri tespit edilir. Öteleme işlemi sadece belirlenen piksellere uygulanmaktadır. Çeşitli test görüntüleri için bu teknik uygulanarak damgalama yapıldığında bozunumun daha az olduğu tespit edilmiştir. Bölüm 3'te önerilen yöntem, mevcut yöntemlere göre yüksek damga sayısının olduğu uygulamalarda daha avantajlı olmuştur. Aynı görüntüye daha fazla damga eklenmek istendiğinde önerilen yöntem ile daha iyi bir görüntü kalitesi elde edilmektedir. Bu da Bölüm 3'teki yöntemin tercih edilmesinin önemli bir nedenidir.

Aradeğerleme hatasının genişletilmesine dayalı TD yöntemi Bölüm 4’te tartışılmıştır. Bu yöntemde tahmin görüntüsü, Bölüm 3’te kullanılan öngörü algoritması ile değil aradeğerleme algoritmasıyla elde edilmektedir. Bölüm 3’teki gibi uyarlanır damgalama ve piksel seçim teknikleri Bölüm 4’te kullanılmamaktadır. Bölüm 4’te önerilen aradeğerleme hata genişlemesine dayalı TD yönteminin diğer TD yöntemlerinden iki önemli açıdan farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bunlardan birincisi, verileri gömmek için piksel farkı veya tahmin hatası yerine aradeğerleme hatası kullanılmaktadır. İkincisi ise bu yöntemde aradeğerleme hatası olan fark, öteleme işlemleri yerine ekleme yöntemi ile genişletilmektedir. İnterpolasyon hataları, tahmin hatalarına göre daha da genişletilebilmektedir. Tahmin-hata ile karşılaştırıldığında, yöntemimiz birkaç avantaja sahiptir. İlk olarak, Şekil 4.1.’e istinaden, hedef pikseli tahmin etmek için geçerli pikselden önce olması gereken, yarı kapalı çevreleyen pikselleri değil, mevcut pikselden önce ve sonra tam kapalı pikselleri seçiyoruz. Böylece daha etkili ve faydalı piksel etkileşimi oluşturmuş oluruz. Buna ek olarak, görüntü çeşitliliği nedeniyle, tahmin-hata şemalarında uygun bir öngörü yöntemi bulmak güçtür ve öngörünün karmaşıklığı, resmin özelliklerine bağlıdır, ancak yöntemimiz yalnızca orijinal görüntüdeki pikselleri ve piksellerin örnekleri kullanıldığı için interpolasyon algoritması daha kullanışlı ve basittir. Buda interpolasyon-hata algoritmasının tercih edilmesinin diğer önemli bir nedenidir.

Tezimizde önerilen yöntemler, Şekil 5.1.’deki 4 adet görüntü üzerine uygulanmıştır ve performansları incelenmiştir. Kullanılan görüntülerimiz 512 x 512 boyutundadır.



Şekil 5.1. a) Lena b) Baboon c) Plane d) Saiboat, görüntüleri.

Görüntü damgalama yöntemlerini incelediğimiz tezimizdeki deneysel çalışmalarımızın yazılımı, MATLAB üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tezimizde önerilen yöntemlerde eklenecek olan damgalar ise, yazılımımız ile rastgele oluşturduğumuz bit dizilerinden meydana gelmektedir. Fakat farklı görüntüler için, oluşturulan aynı bit dizini kullanılmaktadır.

Kullanılan yöntemlerin performansını karşılaştırmak amacıyla piksel başına damga miktarı (BPP) ve tepe işaret-gürültü-oranı (PSNR) kullanılmıştır.

N_g görüntüye eklenen bit sayısı, M ile N ise görüntünün piksel cinsinden en ve boy uzunluklarıdır. Buradan BPP,

$$BPP = \frac{N_g}{M \times N} \quad (5.1)$$

eşitliğinden hesaplanır. Görüntü kalitesi ifade eden PSNR değerlerimiz ise desibel cinsinden,

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{255 \times 255}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i,j) - I^d(i,j))^2} \right) \quad (5.2)$$

eşitliğinden hesaplanır. Denklemden $I(i,j)$ ile $I^d(i,j)$ ifadeleri sırasıyla orijinal ve damgalı görüntüler için piksellerinin parlaklık seviyelerini göstermektedir. Denklem (5.2) incelendiğinde orijinal ve damgalı görüntü arasındaki fark arttıkça logaritmik değer azalacak dolayısıyla PSNR değerimiz de azalacaktır. Aksi durumda, orijinal görüntü ile damgalı görüntü arasındaki fark azaldıkça logaritmik değer artar ve PSNR değerimiz artmış olur. PSNR değerimiz artması, orijinal ile damgalı görüntü arasındaki farkın az olması sebebi ile görüntü kalitesinin iyi olduğu anlamına gelmektedir.

Aşağıda Tablo 5.1.'de Lena ve Plane test görüntüleri için uyarlanabilir (adaptif) genişletme ve klasik genişletme yöntemlerinin etkileri, deneysel verilerle gösterilmekte ve karşılaştırılmaktadır.

Tablo 5.1. Lena ile Plane görüntülerinin klasik ve adaptif yöntemlere göre BPP ve PSNR kazanç değerleri [25].

	Lena						Plane					
BPP	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95
T(k)	3	4	5	7	10	16	2	3	4	6	10	15
T(a)	3	4	5	7	9	11	3	3	4	5	6	6
PSNR Gain	-0,21	-0,16	-0,12	-0,15	0,10	0,83	-1,93	-0,47	-0,31	0,47	1,60	2,92

Tablo 5.1.'de Lena ve Plane görüntüleri için elde edilen değerler incelendiğinde. Lena görüntümüz için bpp değerlerinin (0,50 – 0,60 – 0,70 – 0,80) olduğu yerlerde klasik ve uyarlanırlı yöntemlerin eşit kapasite değerleri aldığını görmekteyiz. Bu bpp ve kapasite parametre değerlerinde PSNR kazancımızın negatif çıktığı görülmektedir. Uygulamada görüntü kalitesini belirten PSNR kazancının negatif çıkması, istenmeyen bir durumdur. Fakat bpp değerimiz arttıkça, örneğin (0,90 – 0,95) değerlerine geldiğinde adaptif (uyarlanırlı) kapasite değerimiz T(a), mevcut yöntemlerin kapasite değerleri T(k) den düşük çıkmıştır ve PSNR kazancımız pozitif bir artış yaparak önceki bpp değerlerine göre önemli bir yükseliş göstermektedir. Aynı şekilde Plane görüntüsü için bpp değerlerinin (0,50 – 0,60 – 0,70) olduğu yerlerde PSNR kazanç değerlerimiz negatif çıkmıştır ve hatta bpp değerinin 0,50 olduğu yerde adaptif kapasite değerimiz mevcut yöntemlere göre daha fazla değer almıştır. Fakat Plane görüntüsünde de bpp değeri arttıkça adaptif kapasite değeri daha düşük değerler alabilerek PSNR kazanç değerimizi artırabilmektedir. Bu durumda yüksek damga miktarının olduğu ve dolayısıyla bpp oranının yüksek olduğu uygulamalarda adaptif (uyarlanırlı) yöntemin kullanılmasının daha avantajlı olduğunu ve daha iyi bir görüntü kalitesi sunduğunu PSNR kazanç değerinden görmekteyiz.

Aşağıdaki Tablo5.2.'de piksel seçme tekniğinin Lena ve Plane görüntüleri üzerine etkisi ile elde edilen veriler gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Lena ile Plane görüntülerinin piksel seçme tekniğine göre öteleme sayıları ve PSNR kazanç değerleri [25]

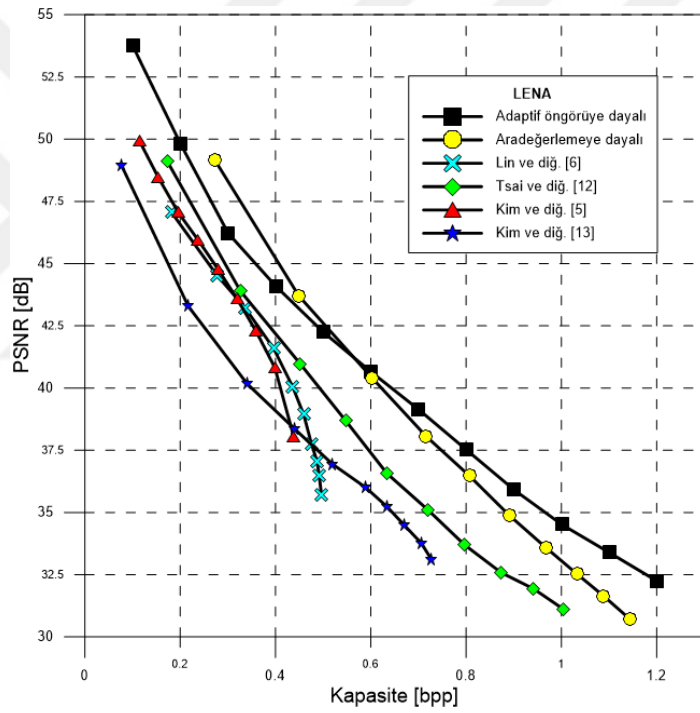
	Lena					Plane				
Bit	10000	20000	30000	40000	50000	10000	20000	30000	40000	50000
$N_s(k)$	27502	71908	11686	155962	197853	26494	47405	64303	86901	109629
$N_s(s)$	24011	47821	82509	119613	176630	12332	17573	25157	53016	62671
PSNR Gain	0,49	1,51	1,31	1,00	0,43	2,49	3,18	2,95	1,65	1,86

Tablo 5.2.'de Lena görüntüsü incelendiğinde, 10000 bit damgalama yapılması durumunda mevcut olan klasik yöntemlerdeki öteleme miktarı $N_s(k)$, 27502'ye eşittir. Piksel seçme tekniği uygulandıktan sonraki öteleme miktarı $N_s(s)$ ise aynı damgalama sayısında, 24011'e eşittir. Görülmektedir ki piksel seçme tekniği ile 3491 adet daha az öteleme işlemi yapılmıştır ve PSNR kazanç değerimiz 0,49'dur. Aynı görüntüde 20000 bit damgalama yapıldığında ise iki yöntem arasındaki öteleme farkı ($N_s(k) - N_s(s)$) 24087'dir ve piksel seçme tekniği ile 24087 adet piksel gereksiz yere ötelenmemektedir. Bu durum bize 1,51 PSNR kazanç değeri sağlamış görüntü kalitesini iyileştirmiştir. 30000, 40000, 50000 adet damgalama yapıldığındaki değerler gözlemlendiğinde piksel seçme tekniği, Lena görüntüsünde en verimli olarak 20000 adet damgalama yapıldığında çalışmıştır. Aynı şekilde Plane görüntüsü incelendiğinde piksel seçme tekniği ile ötelenecek olan piksel sayısı azaltılmaktadır. Tekniğin bu görüntü için de, 20000 damgalama yapıldığında en verimli şekilde çalışmakta olduğunu görmekteyiz. Bunu PSNR kazanç değerinin 3,18 olarak diğer değerlerden üstün gelmesinden anlamaktayız. Görüntüde ötelenecek olan piksel miktarını bu şekilde azalttığı için bu teknik, görüntüdeki bozunumu azaltmaktadır. Piksel seçme tekniği ile damga sayısı artsa da azalsa da mevcut yöntemlere göre kazanç sağlanmıştır. Kazanç miktarı damga sayısına göre değişmektedir.

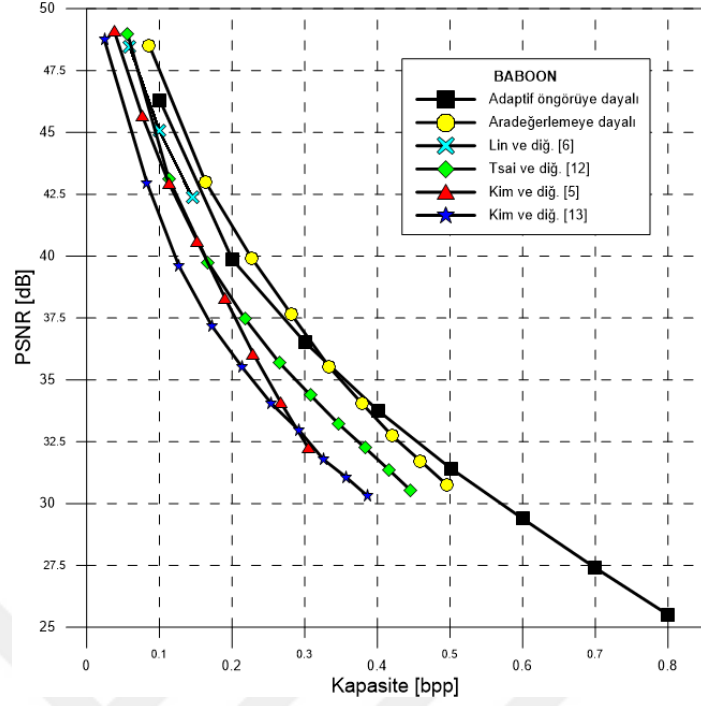
Tezimizde önerilen yöntemler dört adet deney görüntülerimize uygulanarak BPP-PSNR performans grafikleri, deney çıktısı olarak elde edilmiştir. Bu deney çıktılarına önerilen yöntemlere ilaveten, literatür çalışmalarında incelenen yöntemlerin verileri de eklenmiştir ve tüm yöntemler kıyaslanmıştır. Literatür çalışmalarında incelenen

yöntemlerde Lin ve ark.'nın yöntemi, konum haritası olmaksızın fark genişletmeye dayalı kayıpsız veri gizleme üzerinedir. Tsai ve ark.'ı tahmini kodlama ve histogram kaydırma özelliğiyle tersinir görüntü gizleme şeması üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. H.-J. Kim ve ark.'ı tersinir veri gömülmesi için yeni bir fark genişleme dönüşümü yöntemi geliştirmiş ve uygulamışlardır. K.-S. Kim ve ark.'ı ise alt örneklem görüntüleri arasındaki uzamsal korelasyondan istifade edilebilen tersinir veri gizleme yöntemi geliştirmişlerdir.

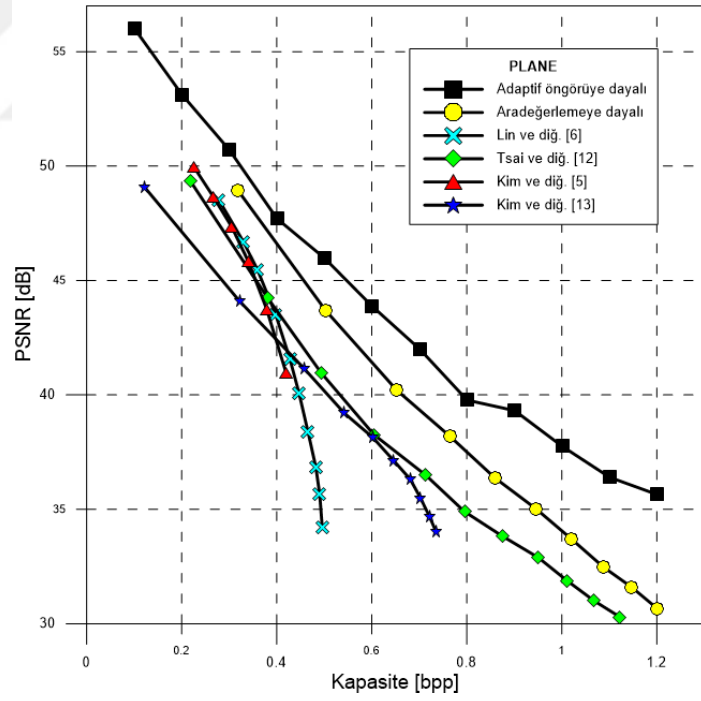
Dört adet görüntü için elde edilen Kapasite (BPP) – PSNR (dB) performans grafikleri.



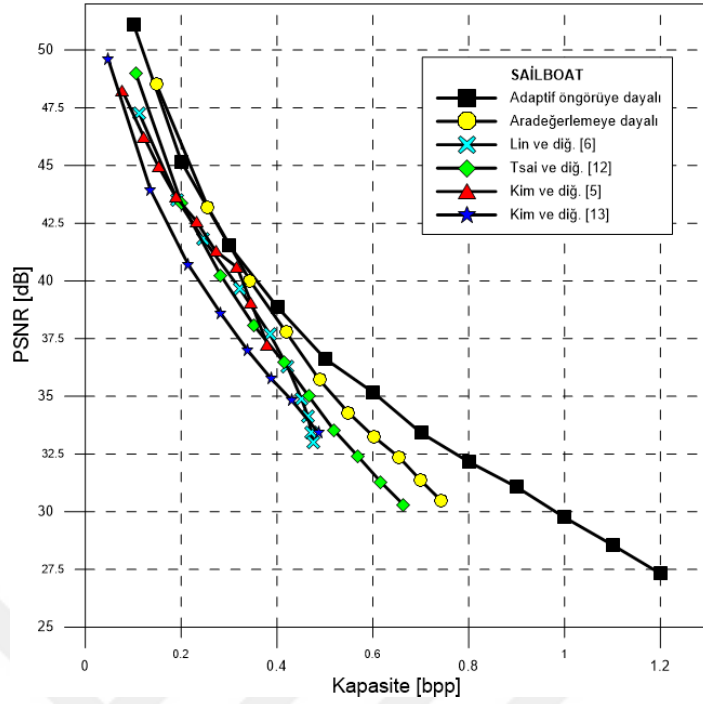
Şekil 5.2. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Lena görüntüsü için performansı



Şekil 5.3. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Baboon görüntüsü için performansı



Şekil 5.4. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Plane görüntüsü için performansı



Şekil 5.5. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Sailboat görüntüsü için performansı

Elde edilen deney çıktıları Şekil 5.2., Şekil 5.3., Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'te Kapasite(BPP) – PSNR (dB) grafikleri şeklinde verilmiştir. Grafiklerdeki eğrilerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir. İlk olarak, eklenen bilgi miktarı (bit) arttıkça yöntemlerin verdiği görüntü kalitesi düşmektedir. Ayrıca bazı yöntemlerde görüntü kalitesinin aniden düştüğü gözlemlenmektedir. Bunun nedeni görüntülerin kapasiteyi sağlayabilmeleri için karşılaştırılan yöntemlerde kullanılan seviye sayısının, önerilen yöntemlerde ise kapasite parametresinin damga miktarını karşılayamamasındandır. Örneğin Plane görüntüsü için Şekil 5.4. incelendiğinde, Lin ve ark.'nın yönteminde 0.5 bpp değerine kadar ani bir düşüş gözlemlenmiştir. Benzer durum Lena görüntüsü için H.-J. Kim ve ark.'nın yöntemlerinde de görülmektedir. Karşılaştırılan yöntemlerdeki seviye sayısı ve önerilen yöntemlerde kapasite parametresindeki artış ek bilgi miktarını artırmakla birlikte görüntü kalitesini kötüleştirmeye neden olmaktadır.

İkinci olarak karşılaştırma için kullanılan yöntemler adaptif (uyarlanır) değildir. Bölüm 3'te çalışmasını gerçekleştirdiğimiz tezimizde önerilen birinci yöntemimiz, uyarlanır olup piksel seçme algoritmasının da etkisi ile tüm görüntüler için

karşılaştırılan yöntemlerden elde edilen verilere göre daha yüksek kapasite ve daha iyi görüntü kalitesi sunmaktadır. Örneğin önerilen yöntem, Tsai ve ark.'ın yöntemi ile karşılaştırıldığında 0.6 bpp seviyesinde, Lena, Plane ve Sailboat görüntülerinde sırasıyla 3 db, 5.5 db, 3.5 db'lik görsel kalite kazancı sağlamıştır. Ayrıca önerilen yöntem ile çok yüksek bpp seviyelerinde damgalama yapmak mümkündür. Grafiklerde görüldüğü gibi karşılaştırılan yöntemler ile genel olarak daha düşük bpp değerlerinde damgalama mümkün iken önerilen yöntem ile 1 bpp değerinde üstüne çıkarak damgalama yapmak mümkündür.

Üçüncü olarak, yöntemlerin performansı görüntülerin histogramlarının şekliyle etkilenmektedir. Düzgün dağılımlı bir histograma sahip görüntüde yöntemler benzer sonuçlar üretmektedir. Bu duruma, Lena görüntüsünde 0.4 bpp ve Sailboat görüntüsünde 0.3 bpp seviyelerine kadar olan performanslar örnek verilebilir.

Son olarak, Bölüm 4'teki tezimizde önerilen ikinci yöntem ile Bölüm 3'deki önerilen ilk yöntem karşılaştırıldığında, ikinci yöntemin düşük kapasite seviyelerinde daha iyi görsel kalite sunduğunu görmekteyiz. Örneğin Baboon görüntüsünde önerilen ikinci yöntem, 0.3 bpp seviyesine kadar diğer tüm yöntemlerden daha iyi görsel kalite sunmuştur. Ancak önerilen ilk yöntemde, damga miktarı arttıkça uyarlanırlar damgalamanın ve piksel seçme tekniğinin etkisi ile hem yüksek kapasitelere ulaşmakta hem de daha iyi görsel kalite değerleri elde edilmektedir. Örneğin Baboon görüntüsünde ilk yöntem 0.8 bpp değerine ulaşabilirken önerilen ikinci yöntem 0.5 bpp seviyelerinde kalmıştır. Benzer şekilde Sailboat görüntüsü için elde edilen grafik incelenirse, ilk yöntem 1.2 bpp değerine ulaşabilirken önerilen ikinci yöntem 0.7 bpp seviyelerinde kalmıştır. Aynı görüntü için 0.6 bpp seviyesindeki görüntü kaliteleri incelendiğinde önerilen ilk yöntem ikinci yöntemden 2.5 db kadar daha iyi görsel kalite sunmaktadır.

Önerilen birinci yöntem kullanılarak Şekil 5.6.'da, Lena, Plane, Sailboat görüntüleri için 0.1, 0.6, 1.2 bpp seviyelerindeki, Baboon görüntüsü için 0.1, 0.4, 0.8 bpp seviyelerindeki damgalanmış görüntüler gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Damgalı görüntüler

Şekil 5.6.'daki görüntüler incelendiğinde bpp seviyesi yükseldikçe görüntülerdeki bozulmaların artmış olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ferguson, N., Schneier, B., Kohno, T., *Cryptography Engineering: Design Principles and Practical Applications*, Chichester : John Wiley & Sons, Inc, 385pp.,2012.
- [2] Barton, J., *Method and Apparatus for Embedding Authentication Information Within Digital Data*. 9971997., 1997
- [3] Podilchuk, C. I., DELP, E. J., *Digital Watermarking: Algorithms and Applications*. July, pp. 33–46, 2001.
- [4] Furht, B., Muharemagic, E., Socek, D., *Multimedia Encryption and Watermarking*. Springer., 2006.
- [5] Dittmann, J., Wohlmacher, P., Nahrstedt, K., *Using Cryptographic and Watermarking Algorithms*, in *IEEE MultiMedia*, vol. 8, no. 4, pp. 54-65, doi: 10.1109/93.959103, Oct-Dec 2001.
- [6] Cayre, F., Fontaine, C., Furon, T., *Watermarking Security: Theory and Practice*, in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, no. 10, pp. 3976-3987, doi: 10.1109/TSP.2005.855418, Oct. 2005.
- [7] Ingemar, M. L., Cox, J., Bloom, J. A., Fridrich, J., Kalker, T., *Digital Watermarking and Steganography: Morgan*. In Kaufmann Publishers, 2008.
- [8] Shi, Y. Q., Ni, Z., Zou, D., Liang, C., Xuan, G., *Lossless Data Hiding: Fundamentals, Algorithms and Applications*, in *Proc. IEEE ISCAS*, vol. 2, pp. 33–36, 2004.
- [9] Feng, J. B., Lin, I. C., Tsai, C. S., Chu, Y. P., *Reversible Watermarking: Current Status and Key Issues*, *Int. J. Netw. Security*, vol. 2, pp. 161–170, May 2006.
- [10] Fridrich, J., Goljan, M., Du, R., *Lossless Data Embedding—New Paradigm in Digital Watermarking*, *EURASIP J. Appl. Signal Process.*, vol. 2002, no. 2, pp. 185–196, Feb. 2002.

- [11] Wang, W., Ye, J., Wang T., Wang, W., Reversible Data Hiding Scheme Based On Significant-Bit-Difference Expansion, in *IET Image Processing*, vol. 11, no. 11, pp. 1002-1014, 11 2017. doi: 10.1049/iet-ipr.2017.0151
- [12] Tian, J., Reversible Data Embedding Using a Difference Expansion. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 13, no. 8, pp. 890–896, Aug. 2003.
- [13] Alattar, A. M., Reversible Watermark Using The Difference Expansion Of a Generalized Integer Transform. *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 13, no. 8, pp. Aug. 2004.
- [14] Kim, H. J., Sachnev, V., Shi, Y. Q., Nam, J., Choo, H. G., A Novel Difference Expansion Transform for Reversible Data Embedding. *IEEE Trans.*, vol. 3, no. 3, pp. 456–465, 2008.
- [15] Lin, C. C., Yang, S. P., Hsueh, N. L., Lossless Data Hiding Based on Difference Expansion without a Location Map. *2008 Congr. Image Signal Process.*, pp. 8–12, 2008.
- [16] Hu, Y., Lee, H., Li, J., DE-Based Reversible Data Hiding With Improved Overflow Location Map. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 19, no. 2, pp. 250–260, Feb. 2009.
- [17] Wang, J., Ni, J., Zhang, X., Shi, Y. Q., Rate and Distortion Optimization for Reversible Data Hiding Using Multiple Histogram Shifting., in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 47, no. 2, pp. 315-326, Feb. 2017.
- [18] Ni, Z., Shi, Y. Q., Aansari, N., Su, W., Reversible Data Hiding. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 354–362, Mar. 2006.
- [19] Hwang, J., Kim, J., Choi, J., A Reversible Watermarking Based on Histogram Shifting. *Int. Workshop Digit. Watermarking, Lect. Notes Comput. Sci.*, vol. 4283, pp. 348–361, 2006.
- [20] Lin, C. C., Hsueh, N. L., A Lossless Data Hiding Scheme Based on Three-Pixel Block Differences. *Pattern Recognit.*, vol. 41, no. 4, pp. 1415–1425, Apr. 2008.
- [21] Tsai, P., Hu, Y. C., Yeh, H. L., Reversible Image Hiding Scheme Using Predictive Coding and Histogram Shifting. *Signal Processing*, vol. 89, no. 6, pp. 1129–1143, Jun. 2009.
- [22] Kim, K. S., Lee, M. J., Lee, H. Y., Lee, H. K., Reversible Data Hiding Exploiting Spatial Correlation Between Sub-sampled Images. *Pattern Recognit.*, vol. 42, no. 11, pp. 3083–3096, Nov. 2009.

- [23] Qiu, Y., Qian, Z., Yu, L., Adaptive Reversible Data Hiding by Extending the Generalized Integer Transformation., in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 23, no. 1, pp. 130-134, Jan. 2016.
- [24] Thodi, D. M., Rodriguez, J. J., Expansion Embedding Techniques for Reversible Watermarking., vol. 16, no. 3, pp. 721–730, 2007.
- [25] Li, X., Yang, B., Zeng, T., Efficient Reversible Watermarking Based on Adaptive Prediction-error Expansion and Pixel Selection. *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 20, no. 12, pp. 3524–33, Dec. 2011.
- [26] Li, X., Zhang, W., Guix, Y. B., Efficient Reversible Data Hiding Based on Multiple Histograms Modification., in *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 10, no. 9, pp. 2016-2027, Sept. 2015.
- [27] Chen, H., Ni, J., Hong, W., Chen, TS., High-Fidelity Reversible Data Hiding Using Directionally Enclosed Prediction., in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 24, no. 5, pp. 574-578, May 2017.
- [28] Ou, B., Li, X., Zhao, Y., Ni, R., Shi, Y. Q., Pairwise Prediction-Error Expansion for Efficient Reversible Data Hiding., in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, no. 12, pp. 5010-5021, Dec. 2013.
- [29] Chen, M., Chen, Z., Zeng, X., Xiong, Z., Reversible Data Hiding Using Additive Prediction-error Expansion., in *Proc. 11th Workshop Multimedia & Security*, pp. 19–24, 2009.
- [30] Wu, X., Lossless Compression of Continuous-Tone Images via Context Selection, Quantization, and Modeling. *IEEE Trans. image Process.*, vol. 6, no. 5, pp. 656–664, 1997.
- [31] Wu, X., Memon, N., Context-Based , Adaptive , Lossless Image Coding. *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 4, pp. 437–444, 1997.
- [32] Weinberger, M. J., Seroussi, G., Sapiro, G., The LOCO-I Lossless Image Compression Algorithm : Principles and Standardization into JPEG-LS. *IEEE Trans. image Process.*, vol. 9, no. 8, pp. 1309–1324, 2000.
- [33] Luo, L., Chen, Z., Chen, M., Zeng, X., Xiong, Z., Reversible ImageWatermarking Using Interpolation Technique. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 5, no. 1, pp. 187–193, 2010.
- [34] Zhang, L., Wu, X., An Edge-guided Image Interpolation Algorithm Via Directional Filtering and Data Fusion. *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 15, no. 8, pp. 2226–2238, Aug. 2006.

- [35] Feng, J. B., Wu, H. C., Tsai, C. S., Chu, Y. P., A New Multi-secret Images Sharing Scheme Using Lagrange's Interpolation. *J. Syst. Softw.*, vol. 76, no. 3, pp. 327–339, Jun. 2005.



EKLER

EK 1: Lena görünütüsü için ilk yöntemden elde edilen deneysel veriler.

Damga miktarı	Kapasite (BBP)	PSNR (dB)	Ek bilgi miktarı	Ek Bilgi		
				T_{kp}	T_{pst}	T_{ue}
26335	0,1	53,75	60	1	3	0
52550	0,2	49,82	60	1	10	0
78765	0,3	46,22	60	2	5	0
104980	0,4	44,09	60	2	18	0
131195	0,5	42,24	60	3	10	0
157410	0,6	40,65	60	4	10	0
183625	0,7	39,14	60	5	14	0
209901	0,8	37,52	60	6	20	1
236115	0,9	35,91	60	9	22	1
262348	1,0	34,52	60	9	20	2
288485	1,1	33,39	60	12	22	2
314778	1,2	32,24	60	12	20	3

EK 2: Baboon görüntüsü için ilk yöntemden elde edilen deneysel veriler.

Damga miktarı	Kapasite (BBP)	PSNR (dB)	Ek bilgi miktarı	T_{kp}	T_{pst}	T_{ue}
26335	0,1	46,30	60	2	15	0
52550	0,2	39,85	60	3	41	0
78765	0,3	36,51	60	5	32	0
104980	0,4	33,76	96	7	36	0
131195	0,5	31,42	150	9	51	0
157410	0,6	29,39	330	12	65	0
183625	0,7	27,40	510	17	58	0
209901	0,8	25,51	1158	24	72	0

EK 3: Plane görüntüsü için ilk yöntemden elde edilen deneysel veriler.

Damga miktarı	Kapasite (BBP)	PSNR (dB)	Ek bilgi miktarı	T_{kp}	T_{pst}	T_{ue}
26335	0,1	56,01	60	1	2	0
52550	0,2	53,12	60	1	3	0
78765	0,3	50,69	60	1	7	0
104980	0,4	47,70	60	2	4	0
131195	0,5	45,97	60	2	9	0
157410	0,6	43,87	60	3	9	0
183625	0,7	42,05	60	3	17	1
209901	0,8	39,77	60	4	64	1
236115	0,9	39,31	60	6	11	1
262348	1,0	37,75	60	6	10	2
288485	1,1	36,40	60	6	42	2
314778	1,2	35,64	60	9	16	2

EK 4: Sailboat görünütüsü için ilk yöntemden elde edilen deneysel veriler.

Damga miktarı	Kapasite (BBP)	PSNR (dB)	Ek bilgi			
			Ek bilgi miktarı	T_{kp}	T_{pst}	T_{ue}
26335	0,1	53,12	60	1	8	0
52550	0,2	45,16	60	2	10	0
78765	0,3	41,51	60	3	14	0
104980	0,4	38,87	60	4	20	0
131195	0,5	36,62	60	5	37	0
157410	0,6	35,17	60	7	21	1
183625	0,7	33,41	60	8	53	1
209901	0,8	32,15	60	9	107	2
236115	0,9	31,07	60	12	42	2
262348	1,0	29,75	132	16	55	2
288485	1,1	28,56	384	18	53	3
314778	1,2	27,32	1878	27	58	3

EK 5: Lena görüntüsü için ikinci yöntemden elde edilen deneysel veriler.

Kapasite (BBP)	PSNR (dB)
0,272	49,17
0,448	43,70
0,602	40,41
0,716	38,05
0,806	36,47
0,890	34,88
0,967	33,58
1,032	32,52
1,088	31,64
1,144	30,70

EK 6: Baboon görüntüsü için ikinci yöntemden elde edilen deneysel veriler.

Kapasite (BBP)	PSNR (dB)
0,086	48,51
0,163	42,99
0,227	39,91
0,281	37,65
0,333	35,51
0,379	34,03
0,420	32,73
0,459	31,72
0,495	30,77

EK 7: Plane görünütüsü için ikinci yöntemden elde edilen deneysel veriler.

Kapasite (BBP)	PSNR (dB)
0,318	48,93
0,502	43,68
0,652	40,20
0,763	38,20
0,859	36,37
0,946	35,01
1,019	33,71
1,087	32,47
1,147	31,59
1,201	30,64

EK 8: Sailboat görünütüsü için ikinci yöntemden elde edilen deneysel veriler.

Kapasite (BBP)	PSNR (dB)
0,148	48,52
0,255	43,17
0,343	40,01
0,419	37,76
0,488	35,70
0,548	34,29
0,602	33,23
0,655	32,35
0,699	31,35
0,742	30,47

ÖZGEÇMİŞ

Emre Altinkaya, 29.06.1994 tarihinde Karabük'te doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Karabük'te tamamladı. 2012 yılında Vakıfbank Zübeyde Hanım Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2012 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü 2016 yılında bitirdi. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı.