

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARADEĞERLEME HATALARINA DAYALI
BÖLGESEL TABANLI UYARLANABİLİR
TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA**

DOKTORA TEZİ

Can YÜZKOLLAR

**Enstitü Anabilim Dalı : BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ümit KOCABIÇAK

Haziran 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARADEĞERLEME HATALARINA DAYALI
BÖLGESEL TABANLI UYARLANABİLİR
TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA**

DOKTORA TEZİ


Can YÜZKOLLAR

Enstitü Anabilim Dalı : **BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM
MÜHENDİSLİĞİ**

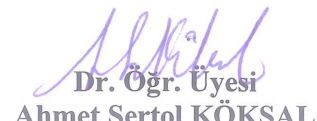
Bu tez 21 / 06 /2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
İsmail Hakkı CEDİMOĞLU
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Ümit KOCABIÇAK
Üye


Prof. Dr.
Cemil ÖZ
Üye


Prof. Dr.
Resul KARA
Üye


Dr. Öğr. Üyesi
Ahmet Sertol KÖKSAL
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.

Can YÜZKOLLAR

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Ümit Kocabıçak ve tez izleme komitesinde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Cemil Öz ve Prof. Dr. İsmail Hakkı Cedimoğlu'na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Doktora çalışmalarım süresince gösterdiği anlayış ve verdiği destek ile beni her zaman teşvik eden eşim Esra'ya ve motivasyon kaynağı biricik evlatlarım Ceyda ve Mustafa Mert'e, dostlarım Burhan Baraklı ve İbrahim Yıldırım'a, son olarak da üzerimde büyük emekleri olan annem ve babama sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA	7
2.1. Giriş.....	7
2.2. KS Tabanlı TGD Algoritmaları	9
2.3. FG Tabanlı TGD Algoritmaları	12
2.4. HD Tabanlı TGD Algoritmaları	18
2.5. Hata Genişletme Tabanlı TGD Algoritmaları.....	22
2.5.1. ÖH genişletme tabanlı TGD algoritmaları	23
2.5.2. Aradeğerleme hatası genişletme tabanlı TGD algoritmaları....	28
BÖLÜM 3.	
HATAYA DAYALI TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA	
YÖNTEMLERİNDE TAHMİN OPRETÖRLERİ.....	31
3.1. Giriş	31
3.2. Doğrusal Öngörü Yöntemi.....	33

3.3. Ortanca Kenar Dedektörü Öngörü Yöntemi.....	34
3.4. Gradyan Ayarlamalı Öngörü Yöntemi	37
3.5. Aradeğerleme Yöntemi.....	39
3.6. Hata Değerlerinin Karşılaştırılması.....	43

BÖLÜM 4.

BÖLGESEL TABANLI UYARLANABİLİR TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA.....	48
4.1. Giriş	48
4.2. Aradeğerleme Hatalarının Elde Edilmesi.....	49
4.3. Bölge Tabanlı Aradeğerleme Hatası Genişletme.....	52
4.4. Piksel Sınıflandırma ve Uyarlanabilir Damgalama.....	54
4.5. Piksel Seçim İşlemi.....	58
4.6. Önerilen Yöntem.....	59
4.6.1. Damgalama algoritması.....	60
4.6.2. Yan bilgilerin elde edilmesi.....	64
4.6.3. Damga ve orijnal görüntünün geri elde edilmesi.....	67

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	70
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	84

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AHG	: Aradeğerleme hatası genişletme
BPP	: Piksel başına düşen bit sayısı
BTAHG	: Bölgesel tabanlı aradeğerleme hatası genişletme
DÖY	: Doğrusal öngörü yöntemi
FG	: Fark genişletme
GAP	: Gradyan ayarlamalı öngörü
HD	: Histogram değiştirme
HDTGD	: Hataya dayalı tersinir görüntü damgalama
HG	: Hata genişletme
KS	: Kayıpsız sıkıştırma
LSB	: En düşük anlamlı bit
MED	: Ortanca kenar dedektörü
MSE	: Ortalama karasel hata
ÖH	: Öngörü hatası
ÖHG	: Öngörü hatası genişletme
PSNR	: Tepe işaret gürültü oranı
SD	: Sayısal damgalama
SolHist	: Sol Histogram
SağHist	: Sağ Histogram
TD	: Tersinir damgalama
TGD	: Tersinir görüntü damgalama
YBB	: Yan bilgi bölgesi
YBBD	: Yan bilgi bit dizisi
<i>b</i>	: Damga biti
<i>bayrak</i>	: Örneklenmiş piksellerin damgalandığını belirleyen değişken
C_{pp}	: Problemlili piksellerin sayısı

DBK	: Damga bitiş koordinatı
e	: Hata değeri
e	: Hata değeri
J_s	: Örnekleilmiş pikseller
J_{ns}	: Örneklememiş pikseller
k	: Damgalama parametresi
P_c	: Damgalanmış piksel sayısı
P_s	: Ötelenmiş piksel sayısı
SS	: Standart sapma
T	: Kapasite parametresi
x	: Piksel değeri
x^w	: Damgalı x pikselinin değeri
W_t	: Damga dizisi
Δ_{tha}	: Uyarlamalı damgalama için eşik değeri
Δ_{ths}	: Piksel seçimi için eşik değeri

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Geleneksel SD ve TD yöntemlerinin genel gösterimi.....	4
Şekil 2.1. TGD algoritmalarında damga ekleme işleminin genel gösterimi.....	9
Şekil 2.2. TGD algoritmalarında damganın ve orijinal görüntünün geri elde edilmesi işleminin genel gösterimi.....	9
Şekil 2.3. KS yöntemi damga ekleme adımları.....	10
Şekil 2.4. KS yöntemi damga çıkartma adımları	10
Şekil 2.5. Örnek bir görüntü kesiti için KS yönteminin uygulanması.....	12
Şekil 2.6. Tian tarafından geliştirilen FG algoritmasının genel gösterimi.....	15
Şekil 2.7. 512x512 boyutunda lena görüntüsüne ait histogram.....	18
Şekil 2.8. HD yönteminin genel gösterimi.....	20
Şekil 2.9. MED yöntemi ile öngörü hatası hesaplama.....	23
Şekil 2.10. Öngörü hatalarında damgalama ve öteleme işleminin gösterimi.....	26
Şekil 2.11. Örnek bir görüntü için ÖHG histogramının genel gösterimi	27
Şekil 3.1. HDTGD yöntemlerinin temel gösterimi.....	32
Şekil 3.2. Doğrusal öngörü yönteminin 5 x 5 görüntü kesiti için örnek gösterimi.....	34
Şekil 3.3. MED öngörü hesaplama yöntemi gösterimi	36
Şekil 3.4. GAP öngörü hesaplama yöntemi gösterimi	38
Şekil 3.5. Aradeğerleme hesaplama yönteminin gösterimi	41
Şekil 3.6. Lena test görüntüsü ve 512 x 512 boyutunda lena görüntüsüne ait hisistogram.....	43
Şekil 3.7. Plnae test görüntüsü ve 512 x 512 boyutunda plane görüntüsüne ait hisistogram.....	43
Şekil 3.8. Baboon test görüntüsü ve 512 x 512 boyutunda baboon görüntüsüne ait hisistogram.....	44
Şekil 3.9. Lena görüntüsüne ait hata histogramları.....	44

Şekil 3.10. Plane görüntüsüne ait hata histogramları.....	45
Şekil 3.11. Baboon görüntüsüne ait hata histogramları.....	45
Şekil 3.12. 150 test görüntüsüne ait hata değerlerinin ortalamalarına ait histogramlar	46
Şekil 4.1. Örnek bir görüntü kesiti için örneklenmiş ve örneklenmemiş pikseller.....	50
Şekil 4.2. $T_{sol} = 1$ ve $T_{sağ} = 2$ değeri için sol bölgede $e_1 = -1$, sağ bölgede $e_2 = 0$ ve $e_3 = 1$ değerlerinin damgalamada kullanılabileceği örnek bir hata histogramı gösterimi.....	53
Şekil 4.3. Aradeğerleme hatası değerlerine ait görüntü piksellerinin sınıflandırılması.....	57
Şekil 4.4. Önerilen yönteme ait damgalama işlemi.....	60
Şekil 4.5. Önerilen yöntem ile damgalama parametrelerinin belirlenmesine ait blok diagram.....	64
Şekil 4.6. Problemlili piksellerin 5×5 'lik görüntü kesiti üzerinde örnek gösterimi.....	66
Şekil 4.7. Yan bilgileri temsil etmek için gerekli bit miktarları.....	66
Şekil 4.8. $M \times N$ 'lik bir görüntüde yan bilgilerin saklandığı bölge.....	67
Şekil 5.1. Damgalama için kullanılan örnek test görüntüleri.....	71
Şekil5.2. Lena görüntüsü için önerilen yöntem ile diğer yöntemlerin kapasite bozunum performansı karşılaştırması.....	74
Şekil 5.3. Plane görüntüsü için önerilen yöntem ile diğer yöntemlerin kapasite bozunum performansı karşılaştırması.....	75
Şekil 5.4. Baboon görüntüsü için önerilen yöntem ile diğer yöntemlerin kapasite bozunum performansı karşılaştırması.....	75
Şekil 5.5. 150 adet test görüntüsü ile elde edilen sonuçların ortalamalarının önerilen yöntem ile diğer yöntemlerin kapasite bozunum performansı karşılaştırmaları.....	76

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Kapasite parametrelerine göre damgalama işleminde kullanılabilir aradeğerleme hatalarının belirlenmesi.....	54
Tablo 4.2. Örnek hata değerlerine 1 bit ve 2 bit damgalama yapıldığında oluşan bozunum miktarları.....	56
Tablo 5.1. Lena görüntüsü için ÖHG yöntemi ile BTAHG'nin yalın halinin görsel kalite ve ötelenen piksel olarak karşılaştırılması.....	72
Tablo 5.2. Plane görüntüsü için ÖHG yöntemi ile BTAHG'nin yalın halinin görsel kalite ve ötelenen piksel olarak karşılaştırılması.....	72
Tablo 5.3. Lena görüntüsü için geleneksel ÖHG, yalın BTAHG ve uyarlanabilir BTAHG'nin damgalama performansları.....	73
Tablo 5.4. Plane görüntüsü için geleneksel ÖHG, yalın ve BTAHG uyarlanabilir BTAHG'nin damgalama performansları.....	73
Tablo 5.5. Lena görüntüsü için piksel seçme işleminde ötelenen piksel sayıları ve görsel kalite kazancı.....	74

ÖZET

Anahtar kelimeler: Görüntü damgalama, tersinir damgalama, tersinir görüntü damgalama, uyarlanabilir tersinir görüntü damgalama, aradeğerleme hatası genişletme

Bu tezde aradeğerleme hatalarının bölgesel tabanlı damgalandığı yeni bir tersinir görüntü damgalama yöntemi önerilmiştir. Piksellere ait tahmin değerlerinin elde edilmesinde, pikseller arasındaki uzamsal ilintinin etkin bir şekilde kullanıldığı aradeğerleme yöntemi kullanılmıştır. Aradeğerleme işlemi ile elde edilen tahmin değerleri orijinal piksel değerlerinden çıkarılarak piksellere ait hata değerleri elde edilmiş, bu hata değerleri yeni bir yaklaşım ile damga eklemek için kullanılmıştır.

Önerilen yöntem; aradeğerleme hatalarının histogramında birden fazla hata değerinin damgalandığı bölgesel tabanlı yeni bir tersinir görüntü damgalama yöntemidir. Aradeğerleme hatası histogramı iki bölgeye ayrılarak her bölgeye ait parametrelerin iteratif olarak belirlenmesi ile hedeflenen kapasite değerine daha hassas bir şekilde ulaşılması sağlanmış, böylece damgalanmış görüntü üzerindeki bozunum azaltılmıştır. Bu yeni yöntemde, aradeğerleme hatalarının damgalanmasında daha verimli sonuçların elde edilebilmesi için, uyarlanabilir bir yaklaşım ile hangi piksellerin bir bit hangilerinin birden fazla bit ile damgalanacağına karar verilmektedir. Bu yaklaşım damgalanacak piksellere yer açmak amacıyla ötelenen piksellerin azaltılmasını sağlayan piksel seçme işlemi ile daha da verimli hale getirilmiştir. Önerilen yöntemin, literatürde sıklıkla kullanılan damgalama yöntemlerinden kapasite ve bozunum performansı açısından daha iyi sonuçlar verdiği bilgisayar benzetimleri ile gösterilmiştir.

REGION BASED ADAPTIVE REVERSIBLE IMAGE WATERMARKING BASED ON INTERPOLATION ERROR EXPANSION

SUMMARY

Keywords: Image watermarking, reversible watermarking, reversible image watermarking, adaptive reversible image watermarking, interpolation error expansion

In this thesis, a new reversible image watermarking method is proposed, in which interpolation errors are watermarked in a region based manner. In order to obtain prediction values of the pixels, interpolation method which exploit the spatial correlation of image pixels effectively is used. Prediction error value of a pixel is obtained by calculating differences between the original pixels and the prediction values obtained by the interpolation process. These error values is used to add watermark with a new approach.

Proposed method; is a new region-based reversible image watermarking method where more than one error value is watermarked in the histogram of the interpolation errors. The interpolation error histogram is divided into two regions and the parameters related to each region are iteratively determined so that the target capacity value can be reached more precisely. Thereby, distortion on watermarked image is reduced. In this new method, for the sake of efficiency, while interpolation errors are watermarked, it is decided with an adaptive approach which pixels are to be watermarked with one bit, and which pixels are watermarked with more than one bit. This approach has been made even more efficient by pixel selection, which reduces the pixels that are shifted to make room for the watermarked pixels. The superiority of the proposed method in terms of capacity and distortion performance over other methods commonly used in the literature is showed by computer simulations.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanoğlu var olduğundan beri birbiriyle ile iletişim halinde olmuş, iletişim için pek çok yöntem kullanmıştır. İlk başlarda mağara duvarlarına çizilen resim ve şekillerle anlaşan insanoğlu zamanla belirli şekillere ve sembollere dayanan alfabeler oluşturarak iletişimlerini geliştirmişlerdir. Gizlice iletişim kurma fikri de iletişimin kendisi kadar eskidir ve çoğu kez iletilmek istenen verinin gizlenmesini gerektirmiştir. Tarihte gizli haberleşmeye dair ilk kayıtlara eski yunan edebiyatında rastlanmaktadır. Herodot'un [1] antik çağlara ait tarihsel eserinde bugünkü İran sınırları içerisinde yer alan Susa şehrinde göz hapsine alınan Histiaeus'un güvendiği bir köleyi İyonya'ya(bugünkü Muğla-Milas) gönderme hikayesi yer almaktadır. Histiaeus kölenin saçlarını kazıtıp gizli mesajını kölenin kafa derisine dövme olarak işlemiştir. Kölenin saçları uygun uzunluğu geldiğinde ise mesajı iletmek üzere köleyi Milas'a göndermiştir. Köle Milas'a ulaşıp saçları kazıtıldığında Pers Krallığı'na karşı bir isyan başlamasına dair mesaj ortaya çıkar. Yine eski çağlarda insanlar, tahta tabletler üzerine yazdıkları yazıları balmumu tabakası ile gizleyip, bu tahtaların boş tabletler olarak görünmesini sağlayacak şekilde bilgileri gizlemişlerdir [2]. Birinci dünya savaşına kadar tarihin çeşitli dönemlerinde görünmeyen yazılar ve metin içerisinde çeşitli maskeleye teknikleri ile gizlenen mesajlar veri gizleme tekniği olarak kullanılmıştır. Birinci dünya savaşında ilkel mikro noktalama tekniği kullanan Almanlar ikinci dünya savaşında bu tekniği geliştirmişlerdir. Gizli verilerin fark edilemeyecek boyutta minik noktacıklar halinde metin kağıtları üzerine yerleştirilmesine dayanan bu teknik ile; alıcı tarafından metin üzerindeki noktalar birleştirildiğinde gizli mesaj ortaya çıkmaktaydı [3].

90'lı yıllarda kullanıcı dostu internet tarayıcılar ile beraber bilgi teknolojilerinde yaşanan gelişmeler ile birlikte sayısal medya kullanımı yaygınlaşmış, buna bağlı olarak da sayısal içeriklerin yönetim ve güvenliği gibi birtakım problemler ortaya çıkmıştır. Sayısal olarak görüntü, ses ve video gibi işaretlerin kolay dağıtımı ve

paylaşımı ile beraber; bilgisayar, telefon, tablet vb teknolojik cihazların günlük yaygın kullanımını bu işaretlere sahip içeriklerin başka kullanıcılar tarafından izinsiz olarak kullanılıp çoğaltılablmesini kolaylaştırmıştır. Bu nedenle sayısal medya içerik üreticilerinin haklarının korunması ve üretilen bu medyalara ait güvenirliliğin sağlanması önemli bir problem olarak ortaya çıkmıştır [4-6]. Ayrıca sayısal içeriklerin kullanıldığı kimi askeri ve tıbbi uygulamalarda verilerin güvenliği önemli bir problemdir. Sinyal işleme, haberleşme ve şifreleme gibi pek çok konuyu kapsayan sayısal damgalama (SD) bu sorunların çözümü için önerilen yöntemlerden biridir. SD, damga adında belirli bir bilgi taşıyan bir sayısal işaretin; örtü adı verilen ses video görüntü gibi başka bir sayısal işarete bu işaretin anlamını bozmayacak şekilde saklanması ve daha sonra saklanan işaretin yetkili kullanıcılar tarafından geri elde edilebilmesi olarak adlandırılabilir.

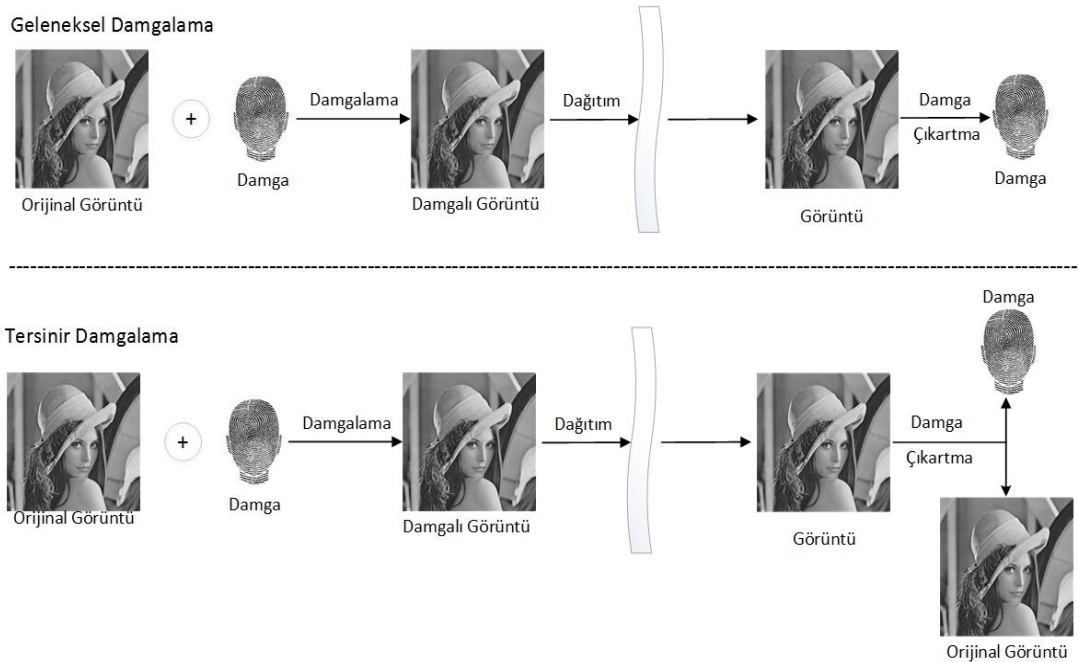
Saklanan mesajın amacı açısından veri gizleme teknikleri gizli yazı (steganography) ve şifreleme (encryption) ve damgalama (watermarking) olmak üzere üç katagoriye ayrılabilir. Gizli yazı ve şifreleme genellikle haberleşme sistemlerinde kullanılan veri gizleme teknikleridir. Aralarındaki en önemli fark şifreleme işleminde alıcı ve verici arasındaki gizli haberleşmenin varlığının şifrelenmiş veriyi gören herkes tarafından bilinebilmesi iken, gizli yazı iletilirken iletim ortamı dikkat çekmez ve haberleşmeyi gerçekleştiren kişilerin gizli olarak iletişim kurduğu bilinmez. Verinin örtü olarak adlandırılan bir ortamda gizlenmesi yönüyle birbirine benzeyen gizli yazı ve SD işlemlerinde; gizli yazı genellikle haberleşme sistemlerinde bire-bir iletişimde kullanılırken, SD multimedya içeriklerinin günümüz teknolojik gelişmeleriyle beraber kolayca kopyalanıp çoğaltılablmesiyle ortaya çıkan pek çok alanda kendine kullanım alanı bulmuştur. SD yöntemleri başlangıçta sayısal medya üreticilerinin haklarının korunması amacıyla ortaya çıksa da, sonraları kanun dışı kopyaların tespitine olanak tanıyan satın alınan esere ait sahipliğin belirlenmesi, sayısal medyanın hızlı bir şekilde aranabilmesine olanak tanıyan indeksleme, ticari amaçlı sayısal medyanın istenen zamanda yayınlanıp yayınlanmadığının kontrolünü sağlayan yayın denetleme, yasal olmayan kopyaların donanım kontrolü ile denetimini sağlayan kopyalama koruma gibi alanlarda kullanım alanını artmıştır [5,7].

Sayısal bilgilerin göndericiden alıcıya iletilmesi sırasında korunması amacıyla kullanılan şifreleme işlemlerinde, orijinal işaret üzerinde değişiklik yapılmak istendiğinde şifrenin çözülmesi gerekmektedir. SD işleminde ise, şifrelemenin aksine sayısal içeriğin görüntülenmesi, dinlenmesi, incelenmesi vb engellenmez iken yetkili kullanıcılar tarafından, gizlenen veriye bire-çok şeklinde erişim sağlanabilmektedir. Şifrelemede ise bu işlemler için şifrenin çözülmesi gereklidir ve alıcı şifreli veriyi alıp çözdükten sonra orijinal veri artık korumasızdır [4,5].

SD yöntemlerinin şeffaflık - fark edilmezlik, sağlamlık ve kapasite olmak üzere 3 temel gereksinimi vardır. Şeffaflık, orijinal medya ile damgalanmış medya arasındaki algısal benzerlik olarak tanımlanır. Orijinal medyaya saklanan bilgi damga olarak adlandırılır. Damga; orijinal veriyi minimum derecede etkilemeli, fark edilmemelidir. Sağlamlık, damgalı medyanın çeşitli saldırılara maruz kaldığında dahi medyaya eklenen damganın tekrar geri elde edilebilmesidir. Damgalı medya çeşitli saldırılara ve genel sinyal işleme işlemlerine karşı dayanıklı olmalıdır. Kapasite ya da diğer ismiyle damga yükü ise orijinal bir veriye eklenebilecek en yüksek bilgi miktarı olarak tanımlanabilir [5,8]. SD yöntemlerinde bu üç özellik birbirlerini sınırlayıcı niteliktedir. Herhangi bir damgalama işleminde bu üç özelliğin aynı anda başarılı bir şekilde karşılanması mümkün değildir. Örneğin kapasite ya da sağlamlık arttırıldığında damgalanmış medya orijinal halinden uzaklaşacak, eklenen damga algılanabilir olacaktır.

Geleneksel SD yöntemlerinde damgalamanın ardından orijinal işarette değişiklikler meydana gelmektedir. Damgalı işaretten damga kayıpsız bir şekilde elde edilirken orijinal işarette damga eklenmesi sırasında meydana gelen bozunumlar giderilememekte, dolayısı ile orijinal işaret kayıpsız olarak geri elde edilememektedir. Orijinal işarettaki her verinin önemli olduğu bazı uygulamalarda işaret üzerinde herhangi bir bozunum olması istenmez. Multimedya arşivlerinde, askeri görüntüleme, adli hukukta ve tıbbi görüntüleme gibi işlemlerde SD işlemi gerçekleştirildiğinde damga çıkarımı ile beraber orijinal işaretin de geri elde edilmesi gerekebilir. Örneğin, hastanın kimlik bilgilerinin ve geçmişteki önemli birtakım hastalık detaylarının tıbbi bir görüntüye damgalandığını düşündüğümüzde, damga

çözöldükten sonra görüntü üzerinde oluşabilecek herhangi bir bozunum doğru bir teşhisi mümkün kılmayabilir. Yukarıda bahsedilen uygulama alanlarında damga çözümü sırasında damga ile beraber orijinal işaretin de gerekli olduğu senaryoları gerçekleştirmek için tersinir damgalama (TD) yöntemleri geliştirilmiştir. Damgalanmış işaretten damganın ve orijinal işaretin kayıpsız bir şekilde geri elde edilebildiği yöntemler TD olarak adlandırılmaktadır. TD yöntemleri literatürde kayıpsız veya bozunumsuz damgalama olarak da isimlendirilmekte; damgalama yerine veri gizleme kelimeleri de kullanılmaktadır [9,10]. Geleneksel damgalama yöntemlerinin damga çözümü sırasında orijinal işarete sebep olduğu geri döndürülemez bozunumlar, TD yöntemleri ile giderilmektedir. TD yöntemlerinde, ilk önce orijinal işarete boşluklar oluşturulur ve oluşan boşluğa damga eklenir. Ardından damga çıkartımı ile hem damga hem de orijinal işaret herhangi bir kayıp olmadan geri elde edilir. TD yöntemlerinde sadece damga çözmeye yetkili kişiler damga verisine ve orijinal işarete erişirken, geleneksel damgalama yöntemlerinde hiç kimse orijinal işarete erişememektedir. Şekil 1.1.'de geleneksel SD ve TD yöntemleri kısaca gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Geleneksel SD ve TD yöntemlerinin genel gösterimi

TD yöntemleri kırılğan (fragile) ve yarı kırılğan(semifragile) olmak üzere temelde iki ana gruba ayrılmaktadır [9]. TD alanında yapılan çalışmalarının pek çoğunun yer aldığı kırılğan yöntemlerde damgalı medya ortamında yapılan herhangi bir değişiklik damganın kaybolmasına sebebiyet vermektedir. Yarı kırılğan yöntemlerde ise damgalanmış medya çeşitli sinyal işleme tekniklerine maruz kaldığında damgalı işaret üzerinde meydana gelen değişikler, damganın kaybolmasına sebebiyet vermez. Bu tezde yapılan çalışma kırılğan yöntemler kategorisinde yer almaktadır.

SD alanında yapılan çalışmalarda isimlendirme, damga verisinin saklandığı ve örtü olarak adlandırılan sayısal medyanın türüne göre olmaktadır. Örneğin damga verisinin saklandığı sayısal medya video ise sayısal video damgalama, saklamanın yapıldığı sayısal medya görüntü ise sayısal görüntü damgalama olarak isimlendirme yapılır. TD alanında yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda damganın saklandığı medya ortamı görüntüdür ve bu çalışmalar tersinir görüntü damgalama (TGD) olarak adlandırılır. TGD çalışmalarında temel amaç yüksek damgalama kapasitesine ulaşmaya çalışarak, damgalanmış görüntü üzerinde minimum bozunum oluşmasını sağlamaktır [11]. Literatürdeki çalışmalar da genellikle kapasite artırımında görsel kalitenin korunması üzerine yoğunlaşmıştır. Damga çözümü sırasında damgalanmış görüntüden damganın ve orijinal görüntünün geri elde edilebilmesi için çeşitli yan bilgilerin de damga verisine eklenmesi gerekmektedir. Bu sebeple TGD yöntemlerinde, geleneksel damgalama yöntemlerine göre kapasitenin önemi daha da artmıştır.

Bu tezde, literatürde var olan TGD yöntemleri incelenmiş, aradeğerleme hatalarının bölgesel tabanlı uyaralabilir olarak damgalandığı yeni bir TGD algoritması önerilmiştir. Tez aşığıdaki şekilde düzenlenmiştir.

Bölüm 2’de TGD’da kullanılan temel kavramlar açıklanmış, literatürde var olan ve TGD alanında kullanılan temel yöntemler sınıflandırma yapılarak incelenmiştir.

Bölüm 3’de orijinal görüntü piksellerinin komşuları arasındaki uzamsal ilintiden yararlanarak hesaplanan tahmini piksel değerlerinin TGD alanında kullanıldığı

yaklaşımlar incelenmiştir. İnceleme sonucunda aradeğerleme yönteminin diğer tahmin hesaplama yöntemlerine karşı TGD alanında kullanım üstünlüğü gösterilerek çalışmada neden tercih edildiği açıklanmıştır.

Bölüm 4’de görüntü piksellerinin bölgelere ayrıldığı ve bölgelere ait piksellerin aradeğerleme hatalarının damgalandığı yeni bir TGD algoritması önerilmiştir [12]. Önerilen algoritma bazı hata değerlerinin bir bit bazılarının ise iki bit damgalandığı uyarlanabilir bir yaklaşımla zenginleştirilmiştir. Ayrıca damgalama işleminde kullanıldığında görüntü üzerindeki bozunuma etkisi fazla olan piksel değerleri tesipt edilmiş, bu piksellerin damgalama işleminde kullanılmayıp elimine edilmesiyle, damgalanmış görüntü kalitesi daha da arttırılmıştır.

Bölüm 5’de önerilen yöntemin yalın hali, geleneksel öngörü hatası genişletme yöntemiyle karşılaştırılmış; yöntemin yalın haline uyarlanabilir damgalama ve piksel seçme tekniklerinin katkısı incelenmiştir. Bu katkılar ile zenginleşen yöntemin başarımı diğer yöntemlerle de karşılaştırılmıştır. Ayrıca tezin TGD alanına yaptığı katkılar açıklanarak ve ileride yapılabilecek çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

BÖLÜM 2. TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA

2.1. Giriş

Tersinir görüntü damgalama (TGD), damga adı verilen çeşitli gizli bilgilerin, görüntü içerisine görünmez bir şekilde yerleştirildiği ve istendiğinde yetkili kişiler tarafından bu damga bilgisi ile birlikte orijinal görüntünün de kayıpsız (bozunumsuz) olarak geri elde edildiği bir yöntemdir. TGD kayıpsız görüntü damgalama olarak da adlandırılır [13].

Bir TGD yönteminin başarımını kapasite, görsel kalite ve komplekslik olmak üzere 3 temel özellik belirlemektedir [14]. İşarete eklenebilecek maksimum bilgi miktarına kapasite, damga eklemenin ardından oluşan görüntü kalitesine görsel kalite, algoritmanın karmaşıklığına ise komplekslik denmektedir. Günümüz teknolojik gelişmeleriyle beraber görüntü işleme alanında kullanılan cihazların yeterli donanımsal gereçlere sahip olmasından dolayı, TGD yöntemleri karşılaştırmalarında komplekslik yerine kapasite-görsel kalite değişimi kullanılmaktadır. Çalışmalarda bu karşılaştırmalar yapılırken kapasite için piksel başına bit sayısı (*BPP*), görsel kalite için ise ve tepe-işaret-gürültü-oranı (*PSNR*) ölçütleri kullanılmaktadır. Kapasite ve görsel kalite zıt ilişkilidir. Örneğin damgalanacak veri miktarı yani kapasite arttırıldığında görsel kalite azalacaktır. Kapasite ifadesi $M \times N$ boyutundaki sayısal bir görüntü için piksel başına düşen damgalanan bit miktarı (bit per pixel) olarak

$$BPP = \frac{\text{Eklenen Bit Sayısı}}{M \times N} \quad (2.1)$$

denklemleri ile hesaplanır.

Damgalanmış görüntü ile orijinal görüntü karşılaştırıldığında ortalama karesel hata (MSE) ile, damgalama sonucunda meydana gelen değişiklik tespit edilir.

$$MSE = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [G(i,j) - G^w(i,j)]^2 \quad (2.2)$$

MSE'nin düşük olması durumunda; PSNR değeri yüksek olacak, bu da görüntüye eklenen damganın daha az fark edilebilir olmasını sağlayacaktır. Bir başka ifade ile damgalı görüntü orijinal görüntüye daha yakın olacaktır. Denklem (2.2)'de $G(i,j)$, ilgili indislerdeki orijinal piksel değerini, $G^w(i,j)$ yine aynı indislerdeki damgalı piksel değerini göstermektedir. *PSNR* ise desibel cinsinden aşağıdaki denklem ile elde edilir.

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{255 \times 255}{MSE} \right) \quad (2.3)$$

TD yöntemleri; orijinal işareti tanımlı olduğu uzaydan başka bir uzayda temsil edip, bu yeni uzayda işaretler üzerinde boşluk oluşturma prensibine dayanmaktadır. Oluşturulan boşluklar da veri gizlemek için kullanılır. Temsil dönüşümü olarak adlandırılabilir bu işleminden sonra, ters temsil dönüşüm işlemi ile orijinal uzaya geri dönülerek damgalı işaret elde edilmiş olur [15]. G orijinal görüntü, G^w damgalanmış görüntü, T temsil dönüştürme işlemi ve T^{-1} ters temsil dönüştürme işlemini göstermek üzere orijinal görüntü üzerinde gerçekleştirilen damgalama işlemi Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Damga ekleme işleminde ilk olarak, orijinal işaret temsil dönüştürme işlemine tabi tutularak orijinal işaret üzerinde boşluk oluşturulur, daha sonra da herhangi bir tersinir görüntü damgalama yöntemiyle oluşturulan boşluğa damga eklenir. Damga eklenen bu işarete de ters temsil dönüştürme işlemi uygulandığında G^w ile gösterilen damgalı görüntü elde edilmiş olur. Bu işlemin tersi olan damgalı görüntüden (G^w) orijinal görüntü ve damganın elde edilmesi işlemi de Şekil 2.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. TGD algoritmalarında damga ekleme işleminin genel gösterimi



Şekil 2.2. TGD algoritmalarında damganın ve orijinal görüntünün geri elde edilmesi işleminin genel gösterimi

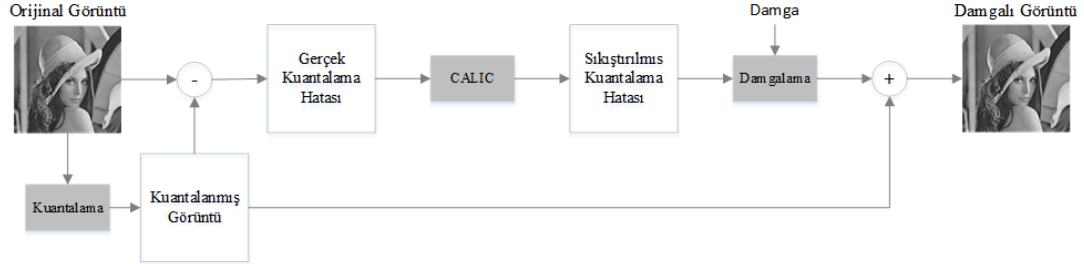
Bir görüntünün tersinir damgalama performansı boşluk oluşturma yöntemine ve damga ekleme algoritmasına bağlıdır. Damgalama için iyi bir boşluk oluşturma yapılmasına rağmen, damgalama algoritmasının etkin kullanılmadığı bir durum damgalama performansını düşürebilmektedir. Karşılaştırmalar aynı görüntü üzerinde yapıldığından performans ölçümlerinde bu iki durumun başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi damgalama performansını artırıcı niteliktedir.

TGD algoritmaları temelde kayıpsız sıkıştırma tabanlı algoritmalar (KS), fark genişletme tabanlı algoritmalar (FG) ve histogram değiştirme tabanlı algoritmalar (HD) olarak üç farklı gruba ayrılmıştır [11]. Son zamanlarda FG ve HD yöntemlerinin özelliklerini birleştiren öngörü - aradeğerleme hatası genişletme tabanlı algoritmalar (çalışmada bu tip algoritmalar hata genişletme tabanlı algoritmalar olarak isimlendirilecektir) algoritmalar alanında yapılan çalışmalar ile bu kategori dörde çıkmıştır. Bahsedilen tüm bu algoritmalar uzamsal domainde gerçekleşmiş olup frekans domaininde de gerçekleştirilen TGD algoritmaları da mevcuttur [16,17,18]. Tez kapsamında uzamsal domainde yapılan çalışmalar incelenmiştir.

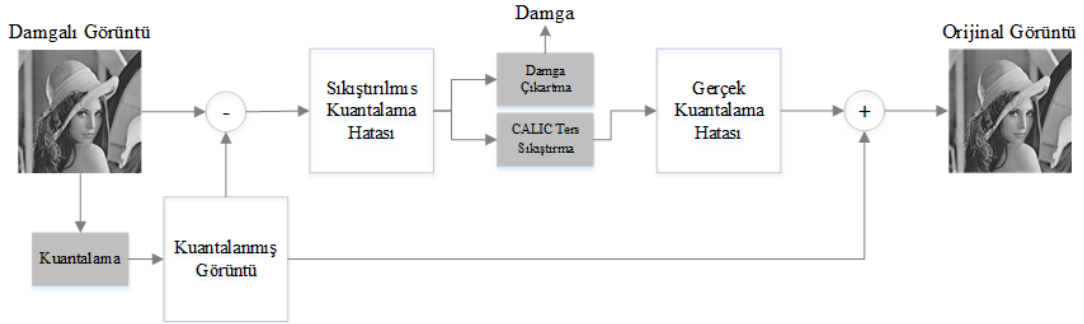
2.2. KS Tabanlı TGD Algoritmaları

KS tabanlı algoritmalar geri dönüşümlü sıkıştırma işlemini ile veri damgalama işlemini gerçekleştirirler. Bu tip yöntemler; uzamsal domainde seçilen bölgedeki piksellerin en düşük anlamlı bitlerini (LSBs), frekans domainde ise yüksek frekanslı

dalgacık katsayılarını kullanırlar [19,20]. Tezin bu bölümünde KS yöntemleri arasında en iyi kapasite bozunum sonuçlarından birine sahip olan Çelik ve ark. [20] tarafından geliştirilen KS yöntemi 4x4'lük temsili bir görüntü için incelenecektir. Yönteme ait damga ekleme ve damga çıkartma blok diyagramları Şekil 2.3. ve Şekil 2.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Çelik ve ark.[20] tarafından geliştirilen KS yöntemi damga ekleme adımları



Şekil 2.4. Çelik ve ark.[20] tarafından geliştirilen KS yöntemi damga çıkartma adımları

x piksel değerini göstermek üzere, her bir piksel değerine Denklem (2.4) 'e göre $\lfloor \cdot \rfloor$ en yakın tam sayı değerine yuvarlama işlemini göstermektedir) L seviye kuantalama işlemi uygulanır.

$$Q_L(x) = L \times \left\lfloor \frac{x}{L} \right\rfloor \quad (2.4)$$

Damga $W = \{10\ 0101\ 1001\}_2$ ve kuantalama değerinin $L = 5$ olduğu durum için orijinal görüntü O ve kuantalanmış görüntü K aşağıda yer almaktadır.

$$G = \begin{pmatrix} 30 & 27 & 15 & 18 \\ 24 & 28 & 16 & 4 \\ 25 & 30 & 15 & 7 \\ 20 & 32 & 21 & 9 \end{pmatrix} \quad K = \begin{pmatrix} 30 & 25 & 15 & 15 \\ 20 & 25 & 15 & 0 \\ 25 & 30 & 15 & 5 \\ 20 & 30 & 20 & 5 \end{pmatrix}$$

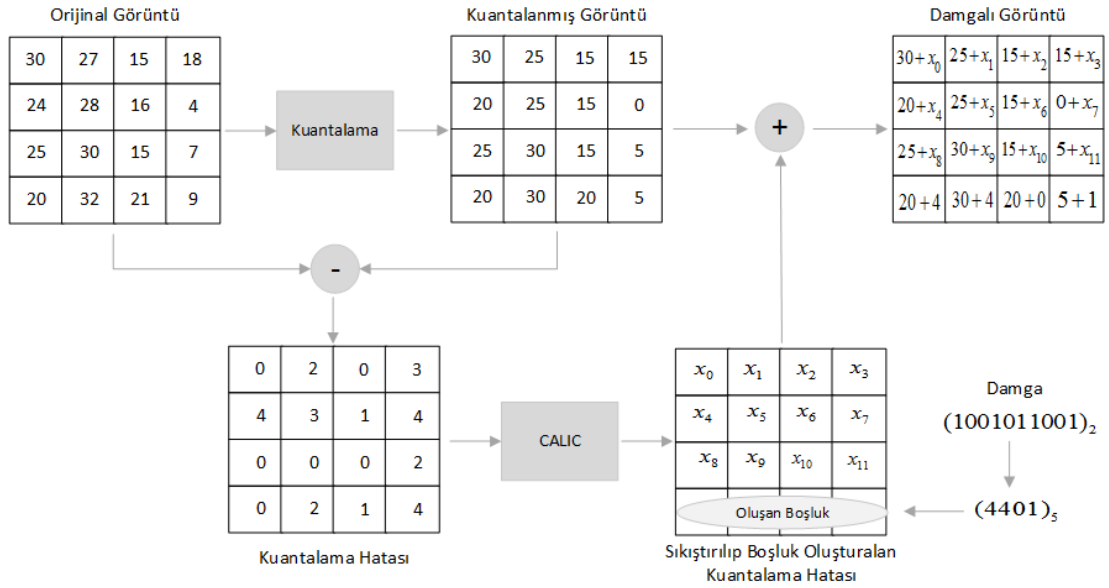
Bu durumda kuantalama hatası görüntüsü $F = O - Q$ şeklinde oluşturulur.

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 & 3 \\ 4 & 3 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 4 \end{pmatrix}$$

Oluşturulan kuantalama hatası görüntüsü CALIC[21,22] kayıpsız sıkıştırma algoritması ile sıkıştırılarak hata görüntüsünün boyutu azaltılır. Verilen örnekte 4×4 boyutundaki kuantalama hatası görüntüsü, elamanları $\{x_0, x_1, \dots, x_{11}\}$ olan sıkıştırılmış hata görüntüsüne dönüştürülmüştür. Sıkıştırma işlemi sonucunda 12 adet kuantalama hatası 3×4 boyutu ile ifade edilebileceğinden, hata görüntüsü orijinal görüntü ile karşılaştırıldığında satır sayısı bir azalmış olur. Satır sayısı azaltılarak boşaltılmış satır, son satır olarak ele alındığında bu son satır damga eklemek için kullanılabilir. Bunun için ikili tabanda verilen damga L 'lik tabanda temsil edilmelidir. Örnekte $W = \{10\ 0101\ 1001\}_2$ olarak ikili tabanda verilen damga bitleri beşlik tabanda $\{4\ 4\ 0\ 1\}_5$ ile temsil edilir. Bu da sıkıştırılmış kuantalama hatasında CALIC algoritması ile boşaltılan son satıra eklenir. Yani bu hata görüntüsünün yeni elamanları $\{x_0, x_1, \dots, x_{11}, 4, 4, 0, 1\}$ olacaktır. Son olarak da oluşturulan bu hata görüntüsü kuantalanmış görüntü ile toplandığında damgalı görüntü elde edilmiş olur.

$$G^w = \begin{pmatrix} 30 + x_0 & 25 + x_1 & 15 + x_2 & 15 + x_3 \\ 20 + x_4 & 25 + x_5 & 15 + x_6 & 0 + x_7 \\ 25 + x_8 & 30 + x_9 & 15 + x_{10} & 5 + x_{11} \\ 20 + 4 & 30 + 4 & 20 + 0 & 5 + 1 \end{pmatrix}$$

Verilen örneğe ait damgalama adımları Şekil 2.5. ile gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Örnek bir görüntü kesiti için KS[20] yönteminin uygulanması

Yönteme ait damga çıkartma işlemi, damgalı görüntüye damga ekleme işlemindeki ilk adım olan L seviye kuantalama işleminin uygulanmasıyla başlar. Damga çözümü sırasında kuantalama işlemi ile elde edilen görüntü, damga ekleme sırasında kuantalanan görüntü ile aynıdır. Dolayısı ile damgalı görüntüden damgalı kuantalanan görüntü çıkarıldığında oluşturulan hata görüntüsünün son satırı 5'lik tabanda damgayı, 3×4 'lük bölümü ise sıkıştırılmış orijinal hata değerlerini göstermektedir. Hata görüntüsünün son satırındaki 5'lik tabanda ki değer 2'lik tabana çevrildiğinde eklenen damga bitleri elde edilmiş olur. Yine hata görüntüsünün 3×4 'lük bölümüne CALIC ters sıkıştırma algoritması uygulandığında ise 16 elemanlı orijinal kuantalanma hatası görüntüsü elde edilir. Son olarak da orijinal kuantalama hatası ile kuantalanmış görüntü birleştirildiğinde orijinal görüntü geri elde edilir.

2.3. FG tabanlı TGD Algoritmaları

Tian tarafından geliştirilen FG yöntemi [14,23] komşu pikseller arasındaki farkları hesaplayıp, hesaplanan fark değerleri içerisinde uygun olanlara damga ekleme prensibine dayanmaktadır. Yöntem ile ilk olarak görüntü yatayda ya da dikeyde komşu piksel çiftlerine ayrılır. Daha sonra komşu piksel çiftlerine haar tamsayı dalgacık dönüşümü ya da S dönüşümü (Denklem 2.5) olarak adlandırılan işlemler uygulanarak bu

komşu piksellere ait ortalama ve fark değerleri hesaplanır. Hesaplanan bu değerlerin yer aldığı sınırlar çerçevesinde bu piksel çiftleri genişleyebilen ve değişebilen olarak adlandırılan iki farklı gruba ayrılır. Bu iki ayrı duruma göre damgalama işlemi gerçekleştirilir, ya da damgalama yapılmadan bu piksel çiftleri orijinal değerinde bırakılır. Kısaca yöntem ile komşu piksel farklarının (h) değerine göre damgalama işlemini gerçekleştirilmektedir.

x ve y gri seviye bir görüntüde komşu iki piksele ait parlaklık seviyelerini göstermiş olsun. Bu değerler gri seviye bir görüntü için $0 \leq x, y \leq 255$ aralığındadır. Bu piksel çiftinin ortalama l ve farkları h , haar tamsayı dalgacık dönüşümü ya da S dönüşümü ile aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$l = \lfloor (x + y)/2 \rfloor \quad h = x - y \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'e ait ters dönüşüm ise

$$x = l + \lfloor (h + 1)/2 \rfloor \quad y = l - \lfloor h/2 \rfloor \quad (2.6)$$

formülü ile hesaplanır. Burada $\lfloor \cdot \rfloor$ işlemi negatif sonsuzluğa doğru en yakın tamsayıya yuvarlama anlamına gelmektedir. x ve y 'nin $[0,255]$ aralığının içerisinde kalması için ise Denklem (2.7) ile verilen eşitsizlikler sağlanmalıdır.

$$0 \leq l + \lfloor (h + 1)/2 \rfloor \leq 255, \quad 0 \leq l - \lfloor h/2 \rfloor \leq 255 \quad (2.7)$$

l ve h tamsayı olmak üzere yukarıdaki denklem düzenlendiğinde

$$h \leq 2(255 - l), \quad h \leq 2l + 1 \quad (2.8)$$

elde edilir. Denklem (2.8)'de yer alan eşitsizlik de

$$\begin{cases} |h| \leq 2(255 - l), & 128 < l < 255 \\ |h| \leq 2l + 1, & 0 \leq l \leq 127 \end{cases} \quad (2.9)$$

eşdeğer koşulu göstermek üzere Denklem (2.9) ile de ifade edilebilir. Yöntem piksel çiftlerinden hesaplanan h değerinin karakteristiğine göre; genişleyebilen, değişebilen ve damgalanmayan fark değerli piksel çifti olarak adlandırılan üç farklı gruba ayrılır. b damga bitini göstermek üzere gri seviye bir görüntüdeki (x,y) piksel çiftine ait h değeri değişebilen olması durumunda

$$2 \times h + b \leq \min(2(255 - l), 2l + 1) \quad (2.10)$$

koşulunu, genişletilebilen olması durumunda ise

$$|2 \times \lfloor h/2 \rfloor + b| \leq \min(2(255 - l), 2l + 1) \quad (2.11)$$

koşulunu sağlamalıdır. Genişleyebilen fark değerlerine

$$h^w = 2 \times h + b \quad (2.12)$$

denklemleri ile, değişebilen fark değerlerine ise,

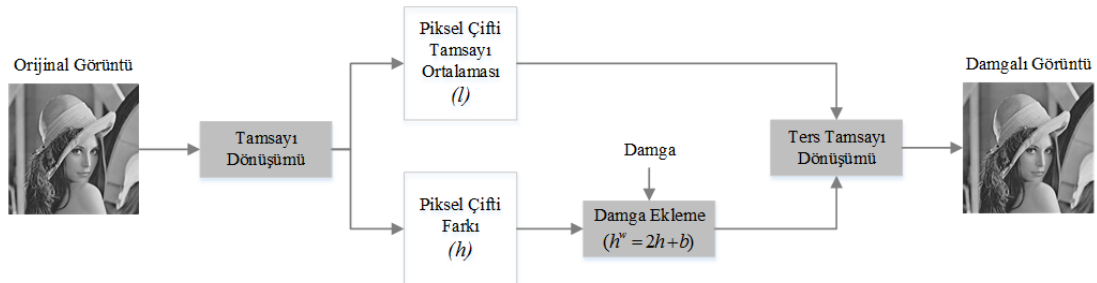
$$h^w = 2 \times \left\lfloor \frac{h}{2} \right\rfloor + b \quad (2.13)$$

denklemleri ile damga bitleri eklenir.

h ve l değeri Denklem (2.10) ve Denklem (2.11) de belirtilen koşulları sağlamıyorsa piksel çifti damgalanmadan bırakılır.

Genişleyebilen farklardan değişebilen farkları ayıran temel özellik genişleyebilen farklara sahip olan piksel çiftlerine herhangi bir koşul olmadan bilgi saklanabilirken, değişebilen çiftlere ait fark değerlerine ait LSB'lerin tersinirliğin sağlanması adına saklanması gerekliliğidir. Bu durum Denklem 2.13'den de anlaşılacağı üzere fark değerlerine ait LSB bitlerinin bir sağa kaydırılıp yok olmasıyla oluşmaktadır. Bu tip durumda olan piksel çiftlerindeki fark değerlerine ait LSB bitlerinin alıcı tarafından

bilinmesi için alıcıya iletilmesi gerekmektedir. Bu yüzden damga ekleme sırasında değişebilen bölgeye ait damgalama işlemlerinde LSB bitleri bir dizi haline getirilip damga dizisine eklenmez. Genişleyebilen ya da değişebilen piksel çiftlerine ait hata değerlerine sırayla . Denklem (2.12) ve Denklem (2.13) ile damga eklenmesi ile oluşturulan damgalı hata değerleri Denklem (2.6)'da orjinal hata değerinin yerine kullanıldığında damgalı piksel çiftleri (x^w, y^w) hesaplanmış olur. Denklem (2.10) ve Denklem (2.11) tanımlamaları dışındaki piksel çiftlerine genişleme ya da değişme işlemi uygulandığında damgalı görüntüdeki parlaklık seviyesi $[0, 255]$ aralığının dışında olacak, dolayısı ile taşma meydana gelecektir. Bu durumda olan piksel çiftlerine damgalama işlemi uygulanmamaktadır. Damga çözümü sırasında hangi piksel çiftlerinin taşma durumu nedeniyle damgalanmadığının belirlenmesi amacıyla bir konum haritası tutulmuştur. Yöntemin yatay yöndeki piksel çiftlerine uygulandığı düşünüldüğünde oluşturulan konum haritasının genişliği görüntünün genişliğinin yarısı kadar, yüksekliği ise görüntünün yüksekliği ile aynı olacaktır. Konum haritasında damga genişleyebilen piksel çiftleri 1, diğer piksel çiftleri ise 0 ile temsil edilir. Konum haritasının boyutu toplam kapasiteyi etkileyeceğinden haritanın boyutu JBIG2 kayıpsız sıkıştırma algoritması ile sıkıştırılarak azaltılır. Sıkıştırılan bu harita, damga bitlerine eklenir. Damga çözümü sırasında da bu haritayı eklenen damga bitinden ayırmak için JBIG2 algoritmasının sıkıştırılan verilerin sonuna eklediği bitiş bilgisinden yararlanılmaktadır. Değişebilen fark değerlerine ait en az anlamlı bit değerleri D , sıkıştırılmış konum haritası H ve damga bitleri P ile temsil edildiğinde görüntüye eklenecek toplam bit dizisi $TP = H \cup D \cup P$ ile ifade edilebilir. Yöntemin damga ekleme prosedürüne ait blok diyagramı Şekil 2.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Tian tarafından geliştirilen FG algoritmasının genel gösterimi

FG yönteminde damga çözümü, damgalama adımında belirlenen yönde seçilen piksel çiftlerine ayrık tamsayı dönüşümü uygulanması ile başlar. Bu dönüşüm ile damgalı fark dizileri $\{h_1^w, h_2^w, \dots, h_n^w\}$ oluşturulmuştur. Daha sonra damgalı piksel çiftleri ve bu çiftlere ait damgalı fark değerlerinden, damga eklenen tüm piksel çiftleri (genişleyebilen ve değişebilen ayrımı olmadan bu bölgeler içerisinde yer alan tüm piksel çiftleri) tespit edilerek bu çiftlere ait fark değerlerinin en az anlamlı bitleri bir bit dizisi halinde bir araya getirilerek TP dizisi elde edilir. JBIG2 sıkıştırma algoritmasının eklediği bitiş bitleri TP bit dizisi içerisinde tespit edilerek konum haritası H oluşturulur. Konum haritası ile genişleyebilen ve değişebilen piksel çiftleri belirlenir ve değişebilen piksel çiftlerine ait LSB bitleri TP diziden çıkarılır. Böylece D ve P de elde edilmiş olur. Son olarak tüm fark değerleri için orijinal hata değerleri; değişebilen piksel çiftleri için hata değerlerinin LSB 'lerinin D dizisinden geri yüklenmesi ile, genişleyebilen piksel çiftlerine ait hata değerleri için ise sağa kaydırma bit işlemi yapılarak elde edilir. Denklem (2.5) ile ters dönüşüm yapıldığında ise orijinal piksel çiftleri geri elde edilmiş olur.

Yöntemi; damgalanmış görüntüde taşma durumunun olmadığı, komşu piksel çiftinin parlaklık seviyelerinin $x = 106$, $y = 100$ ve damga bitinin de $b = 1$ olduğu sayısal bir örnek ile kısaca açıklayalım. Bu piksel değerlerine ait ortalamanın en yakın negatif sonsuzluğa yuvarlanmış değeri ve bu iki piksele ait fark Denklem (2.5) kullanılarak hesaplanır.

$$l = \left\lfloor \frac{106 + 100}{2} \right\rfloor = 103, \quad h = 106 - 100 = 6$$

Damga biti $b = 1$ fark değerinin en düşük anlamlı biti olacak şekilde h değerine eklenir. $h = 6 = (110)_2$ değeri $h^w = (110b)_2 = (1101)_2 = 13$ değerine genişletilmiş olur. Yapılan bu işlem matematiksel olarak Denklem (2.12) ile ifade edilebilir

$$h^w = 2 \times 6 + 1 = 13$$

Damgalanmış piksel çiftleri ise Denklem (2.6) ile

$$x^w = 103 + \left\lfloor \frac{13 + 1}{2} \right\rfloor = 110, \quad y^w = 103 - \left\lfloor \frac{13}{2} \right\rfloor = 97$$

şeklinde hesaplanır. h ve l değerinin karakteristiğine göre tüm damga eklenebilen piksel çiftleri için Denklem (2.10) ve Denklem (2.11) uygulandığında damgalı görüntü elde edilmiş olur.

Damga çıkartma işleminde ise ilk olarak damgalı piksel çiftinin (x^w, y^w) ortalaması (l^w) ve damgalı fark değeri (h^w) Denklem (2.14) ile hesaplanır. Bu işlem sonucunda damgalama işlemine başlarken hesaplanan l değeri ile damgalama işleminden sonra hesaplanan l^w değerinin aynı olması tersinirliği sağlamaktadır.

$$l^w = l = \left\lfloor \frac{x^w + y^w}{2} \right\rfloor \quad h^w = x^w - y^w \quad (2.14)$$

Yukarıda damgalama işleminde kullanılan örnek piksel çifti için Denklem (2.14) uygulandığında ortalama ve damgalanmış fark değerleri elde edilir.

$$l^w = \left\lfloor \frac{110 + 97}{2} \right\rfloor = 103, \quad h^w = 110 - 97 = 13$$

Damgalanmış fark değerinin en düşük anlamlı biti eklenen damgayı, bu fark değeri sağa kaydırma işlemine tabi tutulduğunda ise oluşan yeni değer piksel çiftine ait orijinal fark değerini verir. Yapılan bu işlemler matematiksel olarak aşağıda gösterilmiştir.

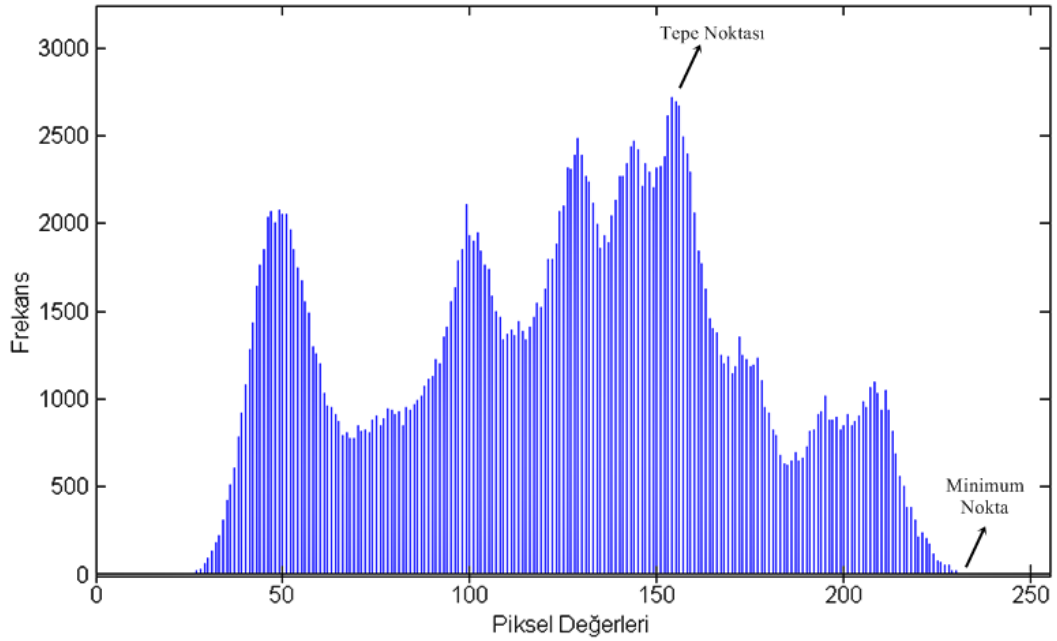
$$b = \text{LSB}(h^w) = \text{LSB}(13) = 1, \quad h = \left\lfloor \frac{h^w}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{13}{2} \right\rfloor = 6$$

Ortalaması ve farkı bulunan piksel çiftlerinden de orijinal değerleri kayıpsız olarak elde edilir.

Tian'nın sunduğu FG yöntemine çeşitli iyileştirmeler yapan çalışmalar mevcuttur. Alattar [24] farklı bir tamsayı dönüşümü ile ikiden fazla komşu piksel kullanarak hesaplama verimliliğini ve damga ekleme kapasitesini arttırmıştır. Tzu ve Chin [25] komşu pikseller yerine gri seviye bir görüntü için bir baytlık piksel değerini yarımşar baytlık bir çift halinde kullanıp damgalama işlemini gerçekleştirmiştir. Kim ve diğerleri [26] FG yönteminde kapasiteyi etkileyen konum haritalarının boyutunu azaltmış, Lin ve diğerleri [27] ise çalışmalarında konum haritasını tamamen ortadan kaldırmışlardır. Hala ve arkadaşları [28] renkli görüntülerdeki piksel değerlerine FG tabanlı bir yaklaşımla bir ya da birden fazla bit damgalamışlardır.

2.4. HD Tabanlı TGD Algoritmaları

HD yöntemi; Ni ve arkadaşları tarafından geliştirilen, görüntü histogramı üzerinde değişiklik yaparak damga ekleme prensibine dayalı tersinir görüntü damgalama yöntemidir [10]. Yöntemde ilk olarak damga eklenecek görüntüye ait histogram hesaplanır. Daha sonra histograma ait maksimum ve minimum değerler (genellikle sıfır değerlidir) belirlenir. Son olarak da histogramda yer alan tepe noktası değerine damga eklemek amacıyla, bazı piksel değerlerinde değişiklik yapılır. Bunun için görüntü histogramında tepe noktası ve minimum nokta arasında kalan piksel değerleri minimum nokta yönünde ötelenir. Böylece öteleme yönünde tepe noktasına komşu parlaklık seviyesine ait piksel değerleri histogramda boşaltılmış olur. Şekil 2.7.'de 512x512 boyutunda lena görüntüsüne ait histogram gösterilmiştir.



Şekil 2.7. 512x512 boyutunda lena görüntüsüne ait histogram

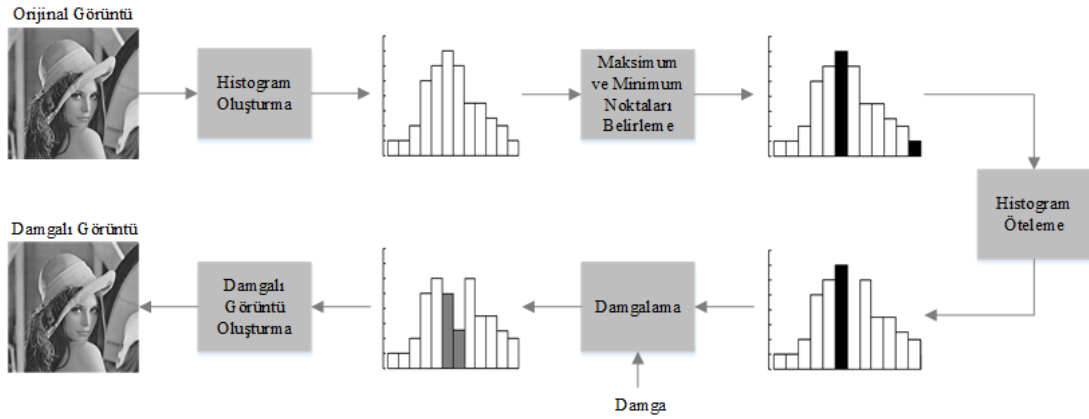
Damga çözümü sırasında orjinal görüntü ve damganın tekrar geri elde edilebilmesi için histogramın minimum ve tepe noktasının damga çözücü tarafından bilinmesi gereklidir. Ayrıca görüntü histogramında minimum noktaya ait piksel değeri sıfırdan farklı ise, öteleme işlemi sonucunda oluşan piksel değerleri ile orijinal minimum noktaya ait piksel değerlerinin karışmaması amacıyla orijinal minimum noktaya ait piksellerin koordinat bilgilerinin de damga çözücüye iletilmesi gereklidir. Yöntemin damgalama kapasitesi histogramın tepe noktasında bulunan piksellerin sayısı kadardır. Gri seviye bir görüntü için damgalama adımları:

1. Görüntünün histogramı ($H(x)$) oluşturulur.
2. Oluşturulan histogramda $H(x)$ en fazla karşılaşılan parlaklık değerine karşılık gelen nokta tepe noktası $h(a)$, en az karşılaşılan parlaklık değerine karşılık gelen nokta ise minimum nokta $h(b)$ olarak seçilir. ($a, b \in [0, 255]$) Bu noktalar damga çözümü sırasında alıcı tarafta bilinmelidir.
3. Histogramın maksimum ve minimum nokta arasındaki piksel değerleri, minimum nokta yönünde ötelenir. Örneğin $a < b$ koşulu için $x \in (a, b)$ durumunu sağlayan tüm $H(x)$ değerleri bir piksel sağa kaydırılır. Diğer bir ifadeyle bu aralıktaki gri seviye piksel değerlerine 1 eklenir. Böylece tepe

noktasına karşılık gelen piksel değerinden bir fazla parlaklık seviyesine sahip pikseller histogramda boşaltılmış olur.

4. Görüntüye ait tüm piksel değerleri ardışıl olarak taranır. Histogramın tepe noktasını gösteren bir gri seviye bir piksel değeri ile karşılaştığında (eğer $x=a$) damgalanacak bit 1 ise piksel değeri bir arttırılır ($x=a+1$), damgalanacak bit 0 ise piksel değeri değişmeden kalır.

HD yöntemine işleyişini gösteren blok diyagramı da Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. HD yönteminin genel gösterimi

HD yönteminde damga çözümü sırasında damga eklenen görüntüye ait tepe noktası ve minimum nokta damga çözücü tarafından bilinmelidir. Şayet minimum nokta sıfırdan farklı ise bu noktaya karşılık gelen piksel değerlerinin koordinatları damga çözücüye gönderilmelidir. O , minimum noktaya ait koordinat değerlerini göstermek üzere, yöntemine ait saf kapasite aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$C=h(a)-O \quad (2.15)$$

Damga miktarı tek bir histogram tepe noktasından hesaplanan saf kapasite miktarından fazla ise damga ekleme işleminde birden fazla maksimum ve minimum nokta çiftleri kullanılabilir.

HD yönteminde orijinal görüntünün ve eklenen damganın geri elde edilebilmesi için uygulanacak adımlar aşağıda yer almaktadır.

1. Damgalama işleminde olduğu gibi görüntüye ait piksel değerleri ardışık olarak taranır. Değeri tepe noktası olan bir piksel ile karşılaşıldığında (eğer $x==a$) damga biti 0, tepe noktasından bir fazla değerli piksel ile karşılaşıldığında ise ($x==a+1$) damga biti 1 olacak şekilde damga bitleri çıkarılır.
2. Görüntü ikinci kez taranır. $(a,b]$ arasındaki piksel değerleri (yan bilgiler dahilinde histogramın minimum noktasına karşılık gelen piksel değerleri hariç) damga ekleme sırasında yer açmak amacıyla yapılan histogram öteleme işleminin tersi yönünde 1 birim öteleme yapılarak orijinal değerlerine getirilir.
3. Damga çıkarımı sırasında yan bilgi olarak minimum noktaya ait koordinat değerleri varsa bu koordinat değerlerine ait pikseller ayarlanarak orijinal görüntü elde edilir.

Tüm işlem tamamlandığında orijinal görüntü ile birlikte eklenen damga da kayıpsız olarak geri elde edilmiş olur.

HD yönteminin; basitliği, bozunumun az olması ve nispeten yüksek kapasiteye çıkabilmesi gibi avantajlarının yanında bazı kısıtlamaları da mevcuttur. Görüntüde sıfır piksel değerlerinin olmadığı ve histogramın minimum noktasının tepe noktası değerine yakın olabileceği bir senaryoda, yan bilgi sayısı çok artacağından kapasite düşük olacaktır. Ayrıca birden fazla minimum noktanın seçilmek zorunda olduğu durumlarda, tepe noktasının minimum noktaların kesişim bölgelerinde yer alması tek bir tepe noktası ve minimum noktanın kullanılmasını zorunlu kılacaktır. Literatürde bu gibi dezavantajları gideren veya yöntemin gelişmesine katkı sağlayan çalışmalar mevcuttur. Hwang ve diğerleri çözücü tarafta yan bilgi ihtiyacını ortadan kaldırarak Ni'nin yöntemini geliştirmişlerdir [29]. Fallahpour ve Sedaaghi görüntüyü bloklara ayırarak her bir bloğun histogramını hesaplamış ve her bir blok için HD yöntemini kullanmıştır. Böylece kapasitede ve görsel kalite de iyileştirme sağlamışlardır [30]. Lee ve diğerleri fark görüntüsünün histogramının kullanıldığı yeni bir yöntem önermişlerdir. Yöntem ile laplacian benzeri dağılımlı, yüksek tepe noktasına sahip olan histogram elde edilerek damgalama performansı iyileştirilmiştir [31]. Chang ve diğerleri yatay olarak komşu piksellerin mutlak değer farklarından bir fark görüntüsü

oluşturarak oluşturulan bu fark görüntüsüne HD yöntemi uygulamışlardır [32]. Tsai ve diğerleri orijinal görüntüyü $n \times n$ piksel boyutunda bloklara ayırıp her bir bloğun merkezindeki piksel ile bloktaki diğer piksellerin farkını hesaplayarak bu fark değerlerine HD yöntemini uygulamışlardır [33].

2.5. Hata Genişletme Tabanlı TGD Algoritmaları

Hata genişletme (HG) tabanlı TGD algoritmaları, temel yaklaşımını FG yönteminden almıştır. Bu algoritmalar doğal görüntülerdeki uzamsal ilintiyi iyi kullanmaları sebebiyle büyük ilgi görmüştür. HG yöntemleri ile; FG yöntemlerinde kullanılan komşu iki piksel arasındaki uzamsal ilinti daha fazla komşu pikseller arasında oluşturularak daha iyi performans elde edilmiştir [34]. Ayrıca FG yöntemlerinde tek seviye damgalamada ulaşılabilen 0.5 bpp'lik maksimum damgalama performansı, HG yöntemlerinde teoride 1 bpp'e kadar çıkabilmektedir. HG yöntemlerinin başarımını arttırmak için 3 temel gereksinim vardır. Bunlar; damgalama sonrasında görüntüdeki bozunumu minimize etmek, görüntüye ait piksel tahminlerini maksimize etmek ve yan bilgi miktarını olabildiğince düşük tutmaya çalışmaktır [35].

FG yöntemlerinin temel prensibi;

- Bir pikselin (x) komşu piksellerinden tahmini bir değerinin (\hat{x}) oluşturulması
- Orijinal piksel değeri ile tahmini piksel değeri arasındaki farkın hesaplanarak hata değerinin ($e = x - \hat{x}$) bulunması
- Bu hata değerinin (e) damgalanıp (e^w) tahmini piksel değerine eklenmesi ile damgalanmış piksel değerinin oluşturulması ($x^w = e^w + \hat{x}$)

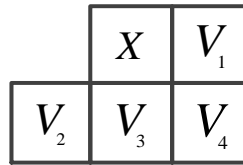
üzerine kuruludur. Damga çözümü sırasında piksele ait aynı tahmin değerinin elde edilmesi HG yöntemlerinin anahtar noktasıdır. Bu sayede damga ve orijinal görüntü kayıpsız olarak geri elde edilebilmektedir.

Literatürde ilk olarak öngörü hatalarının (ÖH) FG yöntemi ile damgalanması biçiminde Thodi ve Rodriguez tarafından önerilmiştir [36]. Daha sonra yine Thodi ve

Rodriguez ÖH'nin histogramına damgalamanın yapıldığı yeni bir yaklaşımla daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir [37]. HG yöntemleri temelde öngörü hatalarının genişletilmesi ve aradeğerleme hatalarının genişletilmesi olarak iki farklı yaklaşıma sahiptir.

2.5.1. ÖH genişletme tabanlı TGD algoritmaları

İlk olarak Thodi ve Rodriguez tarafından öngörü hatalarının genişletilmesi (ÖHG) olarak uygulanmıştır [36,37]. Yalnızca iki komşu piksel arasındaki ilintinin kullanıldığı FG yöntemine göre ÖHG yönteminde daha büyük komşuluğun yerel ilintisi kullanılmıştır. Esasında ÖHG yönteminde yapılan, FG işleminde kullanılan fark operatörünün piksel tahmin operatörü olarak kullanılmasıdır. Bu sayede her piksele ait öngörü hatası genişletilip damgalanabildiğinden; FG ile ulaşılabilen 0.5bpp'lik maksimum kapasite teorik olarak 1 bpp'lik seviyeye kadar çıkabilmektedir. Aşağıda Thodi ve Rodriguez [36] tarafından gerçekleştirilen, görüntüye ait piksellerin öngörü hatalarının damgalandığı ÖHG yöntemi özetlenmiştir.



Şekil 2.9. MED yöntemi ile öngörü hatası hesaplama

Yöntemde ilk olarak ortanca kenar dedektörü öngörü yöntemi (MED prediction scheme) [38] ile görüntüye ait (damga çözümü sırasında aynı öngörü değerlerinin tekrar geri elde edilebilmesi için ilk sütun, son sütun ve son satırın tamamı hesaplama işlemine dahil edilmemelidir) tüm piksellerin alt, sağ ve sol alt köşe komşu piksellerinden öngörü değerleri hesaplanır. Şekil 2.9.'da verilen bir x pikselinin \hat{x} ile belirtilen öngörüsünün MED yöntemi ile hesaplanması Denklem (2.16)'de gösterilmiştir.

$$\hat{x} = \begin{cases} \min(v_1, v_3), & v_4 \geq \max(v_1, v_3) \\ \max(v_1, v_3), & v_4 \leq \min(v_1, v_3) \\ v_1 + v_3 - v_2, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.16)$$

Daha sonra piksellere ait öngörü hatası değeri $e = x - \hat{x}$ hesaplanır. b eklenecek damga bitini göstermek üzere, hesaplanan öngörü hatası (e) değerleri sola bit kaydırma işlemine tabi tutularak damgalama gerçekleştirilir. Bu işlem sonunda elde edilen damgalı öngörü hatası değerinin (e^w) formüle edilmiş hali aşağıda gösterilmiştir.

$$e^w = 2e + b, \quad b \in \{0,1\} \quad (2.17)$$

Son olarak da bu damgalı öngörü hatası değeri, piksele ait öngörü hatasına eklenerek damgalanmış piksel elde edilmiş olur.

$$x^w = \hat{x} + e^w \quad (2.18)$$

Gri seviye bir görüntü için piksel yoğunluk değer aralığı [0-255] olduğundan damgalama işlemi yapılırken bazı piksel değerleri bu sınırlar dışına çıkıp taşma meydana gelebilir. Bu tip bir problemden kaçınmak için damgalama işlemi sırasında taşma meydana gelmeyen ve yöntemde genişleyebilen olarak adlandırılan pikseller damgalama için kullanılmaktadır. Bir pikselin genişleyebilen olarak adlandırılıp damgalama işlemi için kullanılması için Denklem 2.19' de verilen şartı sağlaması gerekmektedir.

$$(x + e) \begin{cases} \leq 254 & \text{eğer } e \geq 0 \\ \geq 0 & \text{eğer } e < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

Damga çözümü sırasında damgalama için kullanılan genişleyebilen piksellere ait koordinat değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bunun için görüntü boyutunda bir matris oluşturularak; bu matriste genişleyebilen pikseller 1, diğer pikseller 0 ile etiketlenir. Bu matris tek boyutlu dizi haline getirilip sıkıştırılır ve sıkıştırılan bu bit dizisinin sonuna dizi sonu belirteci eklenerek CM yan bilgi dizisi oluşturulur. W damga

bitlerini göstermek üzere, yöntemin damgalama kapasitesi $L_w + L_{cm}$ kadar damga bitinin damgalanmasına olanak vermelidir. Yöntemde damgalama işlemi görüntünün sol üst köşesinden başlanarak soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğru gerçekleştirilmiştir. Bu sırayla tüm W damga bitleri Denklem (2.17)'ye göre uygun piksellere damgalanır. Damgalama işlemi bittiğinde CM dizisine ait bitler, yine görüntünün sol üst köşesinden başlamak üzere L_{cm} boyutu kadar pikselin en düşük anlamlı bitleri (LSB) ile yer değiştirilerek bu LSB bitleri bir dizi haline getirilir. Oluşturulan LSB bit dizisi damgalamanın kaldığı yerden devam edilerek görüntüye damgalanır.

Yönteme ait damga çözümü; görüntünün sol üst köşesinden başlanarak damgalama yönü doğrultusunda dizi sonu belirtici ile karşılaşılan kadar tüm piksellerin LSB bitlerinin alınması ile başlar. Böylece hangi piksellere damgalama yapıldığına dair harita elde edilmiş olur. Bu haritaya göre damgalamanın yapıldığı son pikselden geriye doğru geriye doğru piksellerin MED yöntemi ile öngörü hatası hesaplanır ve Denklem (2.20) ile damga çözümü gerçekleştirilir.

$$e^w = x^w - \hat{x}, \quad b = e^w - \left\lfloor \frac{e^w}{2} \right\rfloor, \quad x = x^w - \left\lfloor \frac{e^w}{2} \right\rfloor \quad (2.20)$$

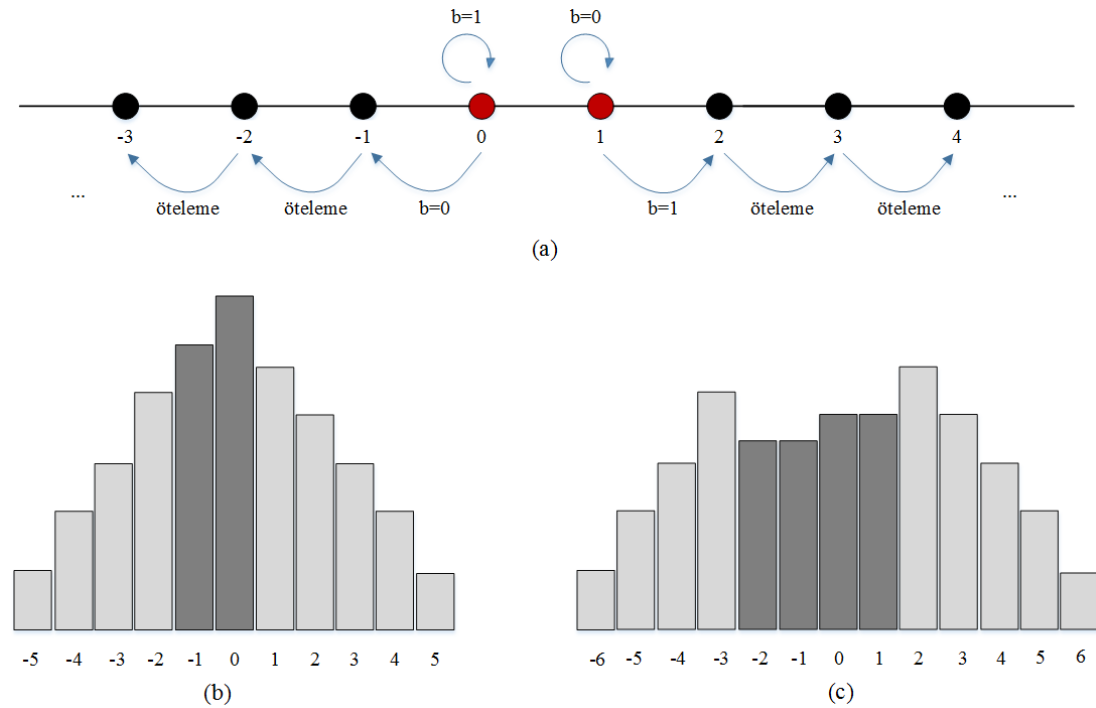
Damga çözümü bittiğinde damga dizisinin başından L_{cm} boyutunda bit ayrıldığında kalan bitler orjinal damga dizisidir. Bu ayrılan bitler görüntünün sol köşesinden başlanıp L_{cm} kadar pikselin LSB leri ile yer değiştirildiğinde ise orijinal görüntü de kayıpsız bir şekilde elde edilmiş olur.

Thodi ve Rodrigez yukarıda bahsedilen çalışmalarından sonra ÖH'larına HD yöntemini uygulayarak damgalama performansını arttırmışlardır [37]. Bu iki yöntem arasındaki temel fark [36] yönteminde yan bilgi sayısındaki fazlalığa karşın sadece damgalanan piksellerde bozunum meydana gelirken, [37] yönteminde damgalama işlemine yer açmak amacıyla damgalama yapılmayan piksellerde de bozunum oluşmaktadır. Buna karşın yan bilgi sayısı azdır ve damgalama performansı daha iyidir. Bu noktadan sonra HG alanında yapılan çalışmalar; görüntüye ait piksel

tahminini maksimize edip, elde edilen hata değerine HD yöntemi ile damgalama işleminin gerçekleştirilmesi prensibi doğrultusunda yoğunlaşmıştır.

Thodi ve Rodrigez [37] tarafından gerçekleştirilen, öngörü hatalarına HD'nin uygulandığı ÖHG yöntemi aşağıda özetlenmiştir.

İlk olarak görüntüye ait piksellerin öngörü değerleri Denklem (2.16)'da verilen MED yöntemi ile hesaplanır. Daha sonra öngörü değeri hesaplanan piksellerin öngörü hatası ($e = x - \hat{x}$) bulunarak tüm piksellerin ÖH'larının yer aldığı ÖH'sı dizisi oluşturulur ($e_1, e_2 \dots e_n$). Bu hata dizisine ait histogram oluşturulur ve bir eşik değeri (t) yardımı ile oluşturulan histogram iç bölge ve dış bölge olmak üzere iki bölgeye ayrılır. Bu ayırma işlemi ÖH hesaplanan pikselin değerine göre $e \in [-t, t]$ ise e iç bölgede, aksi halde dış bölgede olacak şekilde gerçekleştirilir. Burada amaç dış bölgede kalan piksellerin t parametresi doğrultusunda ötelenip iç bölgede kalan piksellere damga ekleme için yer açmaktır. Şekil 2.10.'da öteleme ve damgalama işleminin nasıl yapıldığı basitçe gösterilmiştir.



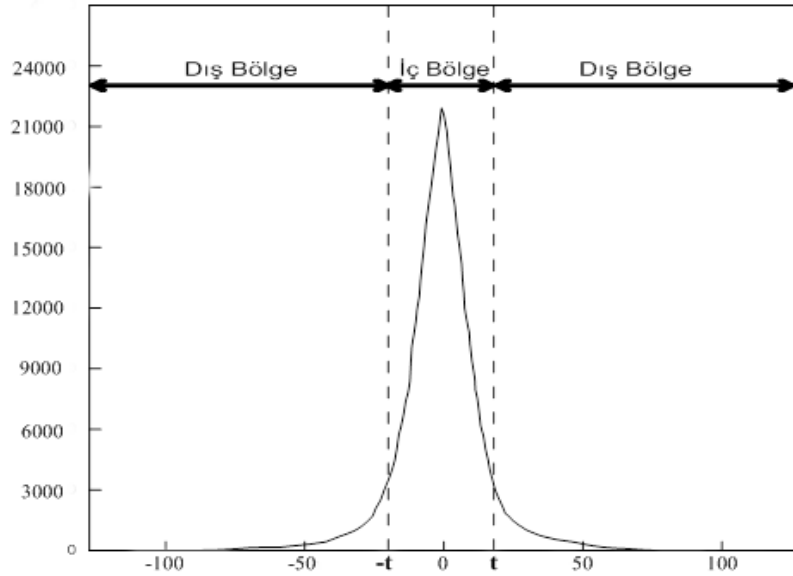
Şekil 2.10. (a) $t=1$ için öngörü hatalarında damgalama ve öteleme işleminin haritasal gösterimi (b) Öngörü hatası histogramı (c) $t=1$ için damgalı öngörü hatası histogramı

Örnek bir ÖHG histogramı Şekil 2.11.'de gösterilmiştir. Kapasite parametresi olarak da adlandırılan t eşik değerine göre yeni hata değerlerinin hesaplanması Denklem (2.21)'de gösterilmiştir. Burada b damga bitini göstermektedir.

$$e^w = \begin{cases} 2e + b, & \text{eğer } e \in [-t, t) \\ e + t, & \text{eğer } e \in [t, \infty) \\ e - t, & \text{eğer } e \in (-\infty, -t) \end{cases} \quad (2.21)$$

Denklem (2.21) 'ye göre hesaplanan yeni hata değerleri ile damgalanmış görüntüye ait piksel değerleri Denklem (2.22) ile elde edilir.

$$x^w = \hat{x} + e^w \quad (2.22)$$



Şekil 2.11 Örnek bir görüntü için ÖHG histogramının genel gösterimi

Damgalanmış görüntüde her bir piksel için maksimum değişim t kapasite parametresi kadar olacağından t değerinin artması bozunumu arttıran bir etmendir. Başlangıçta bu parametre değeri minimum tutulup eklenecek damga miktarına göre iteratif olarak arttırılmalıdır. Damgalama işleminde damgalama ve ötelemenin yapılamadığı taşmaya sebep olan problemlerli pikseller Thodi ve Rodrigez [36] çalışmasına benzer bir yöntemle

konum haritaları yardımıyla etiketlenip sıkıştırılır ve damganın bir parçası olarak görüntüye damgalanır.

Damga çözümü sırasında MED yöntemi ile damgalı görüntüden orijinal görüntüdekiyle aynı öngörü değerleri elde edilir. Böylece damgalamaya katılan tüm pikseller için değişime uğramış öngörü hataları hesaplanabilir. Aşağıda problemlilik pikseller hariç damga bitleri ve orijinal piksel değerlerinin elde edilmesi gösterilmiştir.

- $[.]$ Negatif sonsuzluğa doğru en yakın tamsayı değerini göstermek üzere eğer $-2t < e' < 2t$ ise damga biti $b = e' - 2[e'/2]$ formülü ile, orijinal piksel değeri ise $x = e' - \left\lfloor \frac{e'}{2} \right\rfloor - b$ formülü ile elde edilir.
- Aksi halde bu pikselin damgalama işlemi için kullanılmayıp öteleme işlemi için kullanıldığı tespit edilerek orijinal piksel değeri $x = \begin{cases} x^w - t, & \text{Eğer } e' \geq 2t \\ x^w + t & \text{Eğer } e' < 2t \end{cases}$ ile hesaplanır.

Yukarıda yer alan adımlar tüm pikseller için uygulandığında damga bitleri ve görüntü kayıpsız olarak elde edilmiş olur.

2.5.2. Aradeğerleme hatası genişletme tabanlı TGD algoritmaları

Luo ve arkadaşları tarafından geliştirilen yüksek kapasiteli ve düşük bozunumlu bir damgalama yöntemidir [39]. Komşu piksel farkı yerine aradeğerleme hatalarının kullanılması ve hata değerlerinin damga ekleme aşamasında bit kaydırma işlemi yerine genişletme işlemine tabi tutulması ile FG yöntemlerinden ayrılmaktadır. Yöntemde ilk olarak seçilen bir piksel için onu çevreleyen piksellerden o pikselin aradeğerlemesi elde edilir. (Aradeğerleme işleminin nasıl gerçekleştiği Bölüm 3.5'te ayrıntılı olarak anlatılmıştır) Piksele ait orijinal değer ile piksel için elde edilen aradeğerin farkı alınarak aradeğerleme hatası hesaplanır. \hat{x} , x pikseline ait aradeğerlemesi yapılmış tahmini değeri göstermek üzere aradeğerleme hatası $e = x - \hat{x}$ ile bulunur. Daha sonra aradeğerleme hatalarına ait histogram oluşturulur ve iki en yüksek frekansa sahip hata değeri seçilir. E aradeğerleme hatalarına ait hata

dizisini göstermek üzere ara değerlendirme hatalarına ait iki en yüksek frekanslı hata değeri SAM ve SOM aşağıdaki formül ile elde edilir.

$$\begin{aligned} SOM &= \arg_{e \in E} \max hist(e) \\ SAM &= \arg_{e \in E - \{SOM\}} \max hist(e) \end{aligned} \quad (2.23)$$

$SAM > SOM$ şartı için aradeğerleme hataları iki kısma ayrılır.

- Sol hata değerleri (SOH): e aradeğerleme hatası değeri $e \leq SOM$
- Sağ hata değerleri (SAH): e aradeğerleme hatası değeri $e \geq SAM$

Damgalama işlemi, seçilen bu iki maksimum nokta çerçevesinde HD yöntemiyle Denklem (2.24) ile elde edilir. Denklem (2.24)'te b damga bitini temsil etmekte; $sign(\cdot)$ hata değerinin SAH bölgesindeki değeri için 1, SOH bölgesindeki değeri için -1 değerini almaktadır.

$$e^w = \begin{cases} e + sign(e) \times b, & e = SOM \text{ yada } SAM \\ e + sign(e) \times 1, & e \in (SON, SOM) \cup (SAM, SAN) \\ e, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.24)$$

Yukarıdaki formülde SON , SOH bölgesindeki; SAN ise SAH bölgesindeki minimum histogram değerli hataları ifade eder. Son olarak damgalı piksel değeri damgalı hata değerinin aradeğerlemesi yapılmış piksel değerine eklenmesi ile elde edilir.

$$x^w = e^w + \hat{x} \quad (2.25)$$

Damga çıkarım işleminde, damga ekleme sırasında kullanılan aradeğerleme algoritması ile piksellere ait aynı tahmin değerleri elde edilir. Bu bilgiler ile de damgalı aradeğerleme hatası aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$e^w = x^w - \hat{x} \quad (2.26)$$

SOM, SON, SAM ve SAN değerleri damga çözümü sırasında bilindiğinden damga verisi aşağıdaki formülle çıkarılır.

$$b = \begin{cases} 0, & e^w = SOM \text{ yada } SAM \\ 1, & e^w = SOM - 1 \text{ yada } SAM - 1 \end{cases} \quad (2.27)$$

Aradeğerleme hatası genişletme işleminin ters fonksiyonu ile de aradeğerleme hatası elde edilmiş olur.

$$e = \begin{cases} e^w - \text{sign}(e) \times b, & e^w \in [SOM - 1, SOM] \cup [SAM, SAM + 1] \\ e^w + \text{sign}(e) \times 1, & e^w \in [SON, SOM - 1) \cup (SAM + 1, SAN] \\ e^w, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.28)$$

Tüm bu bilgiler ışığında da orijinal piksel değeri; aradeğerleme hatasının aradeğerleme değerine eklenmesi ile elde edilir.

$$x = \hat{x} + e \quad (2.29)$$

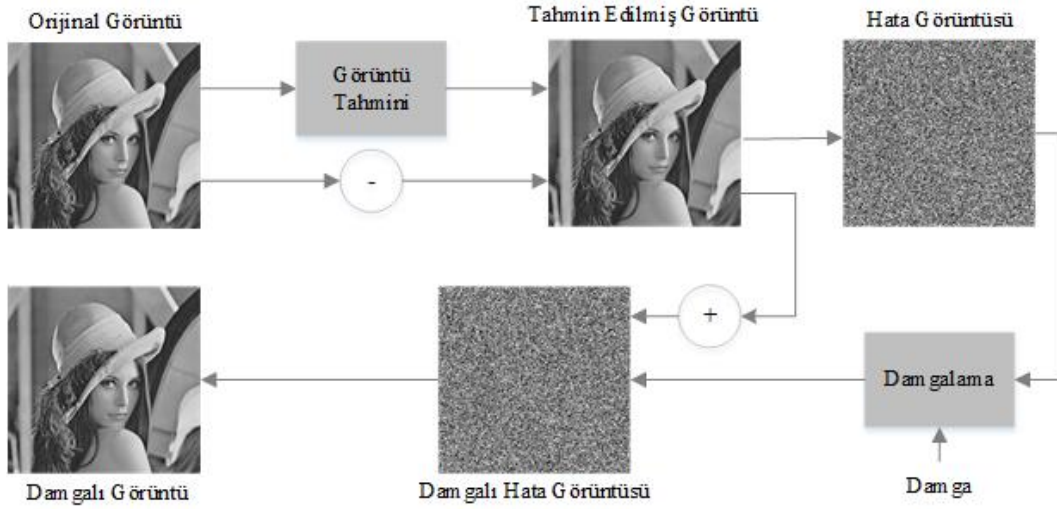
Literatürde HG tabanlı algoritmaların geliştirildiği pek çok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalar genelde iki farklı guruba ayrılabilir. İlk grupta yer alan çalışmalar pikseller için daha gelişmiş tahmin yöntemleri ile daha düşük değerli piksel hataları elde edip kapasite artışı sağlamak üzerine odaklanırken; diğerleri, geçmiş çalışmalarda elde edilen piksel hata değerleri için damgalama algoritmasının etkinliğini arttırmak üzerine yoğunlaşmıştır. Sachnev ve arkadaşları çalışmalarında piksele ait öngörünün eşkenar dörtgensel komşuluklarından hesaplandığı bir yöntem kullanmıştır [40]. Drăgoi ve Coltuc herhangi bir ek bilgi gerektirmeden her bir piksele ait öngörü değerini bölgesel olarak farklı hesaplayan bir yöntem geliştirmişlerdir [41]. Yine Drăgoi ve Coltuc [41] çalışmasında sundukları yöntemde hesaplama karmaşıklığını azaltarak yöntemlerinde iyileştirme sağlamışlardır [42]. Li ve arkadaşları ise uyarlanabilir bir damgalama stratejisi ile yerel karmaşıklığı düşük piksellere ait öngörü hatalarına birden fazla bit damgalamayı başarmışlardır [43].

BÖLÜM 3. HATAYA DAYALI TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA YÖNTEMLERİNDE TAHMİN OPERATÖRLERİ

3.1. Giriş

TGD alanında son zamanlarda yapılan çalışmalar kapasite/bozunum performansı açısından etkin sonuçlar veren hataya dayalı tersinir görüntü damgalama (HDTGD) tabanlı algoritmalar üzerine yoğunlaşmıştır. HDTGD, FG ve HD yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla oluşan bir TGD yöntemidir. HDTGD yöntemlerinin temel stratejisi; görüntüye ait piksellerin tahmini değerlerinin elde edilerek, bu tahmini pikseller ile orijinal pikseller arasındaki fark değerlerine damga ekleme üzerine kuruludur. Bu fark değerleri çalışmalarda “hata” olarak adlandırılmaktadır. Bir piksele ait tahmini değer elde edilirken, bu piksele ait komşu pikseller arasındaki benzerlikten yararlanır. TGD yöntemlerinin temel özelliği olan damga verisinin ve orijinal görüntünün kayıpsız bir şekilde elde edilebilmesi işlemi; orijinal görüntü pikselleri için elde edilen tahmini değerlerin, damgalanmış görüntüde de aynı şekilde geri elde edilmesi ile mümkün olmaktadır.

HDTGD yöntemlerinde kullanılan damgalama yaklaşımı, hata değerlerine HD yöntemi ile boşluklar oluşturup oluşturulan boşluğa damga eklemek üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşım HDTGD yöntemlerinde performans artışı sağlamaktadır. Ayrıca HDTGD yöntemlerinin çok fazla yan bilgi içermemesi damgalama performansını arttıran bir başka etmendir. Şekil 4.1. ile HDTGD işlemlerinin nasıl gerçekleştiği kısaca açıklanmıştır.



Şekil 3.1. HDTGD yöntemlerinin temel gösterimi

HDTGD tabanlı TGD yöntemlerinin başarımını iki kriter belirlemektedir. Bu kriterlerden ilki piksel tahmini için kullanılan yöntemin, komşu pikseller arasındaki uzamsal ilintiyi nasıl kullandığı; ikincisi ise, damgalama algoritmasının ne kadar etkili olduğudur. Örneğin, pikseller arasındaki uzamsal ilinti Thodi [37] ve Tsai [33] tarafından farklı şekillerde kullanılmış, uzamsal ilintiyi daha iyi kullanan yöntemin görsel kalite/ kapasite performansı daha iyi olmuştur. Pikseller arasındaki uzamsal ilinti Li[43] ve Thodi'nin[37] çalışmalarında ise benzer şekilde kullanılmasına rağmen damgalama stratejisi daha etkin olan Li ve arkadaşları tarafından daha iyi görsel kalite/kapasite performansı elde edilmiştir.

HDTGD yöntemlerinde pikseller arasındaki ilintiden yararlanma şekline göre hesaplanan hata değerlerine ait histogram dağılımı değişmekte bu da damgalama performansını etkilemektedir. Genel olarak hata histogramı Laplacian dağılımına sahiptir. Dağılım ortalama ve varyans değerlerine göre şekil alır. Hata histogramına ait ortalama değer büyük oranda 0 olmakla birlikte varyans ile histogramın şekli belirlenir. Varyansı düşük olan histogramda damgalama performansı daha yüksek olmaktadır. [40]

Aşağıda HDTGD yöntemlerinde pikseller arasındaki ilintiden yararlanarak yeni piksel değerlerinin elde edilmesinde kullanılan tahmin operatörleri incelenmiş, piksellere ait orijinal değer ile tahmin değeri farklarının oluşturduğu hata değerlerine ait

histogramlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda önerilen yöntemde kullanılan aradeğerleme işleminin neden kullanıldığına dair sorular; sonuçların bilgisayar benzetimleri ile gösterilmesiyle giderilmiştir. Böylece çalışmada piksel tahminleri için etkin bir ilinti giderme yöntemiyle beraber yeni bir damgalama algoritmasının kullanılmasıyla damgalama işleminde performans artışı sağlanmıştır.

3.2. Doğrusal Öngörü Yöntemi

Görüntü üzerindeki herhangi bir piksel genel olarak komşu pikselleri ile büyük benzerlikler taşımaktadır. Yöntemde bir pikselin komşuları arasındaki bu benzerliklerden yararlanmak üzere görüntü $n \times n$ lik bloklara ayrılır. Her bir blokta, blok içerisinde belirli pozisyona sahip herhangi bir piksel temel piksel olarak seçilir. Doğrusal öngörü yöntemi (LPS-Linear Prediction Scheme) tekniğini TGD yöntemlerinde ilk kullanan Tsai ve arkadaşları çalışmalarında merkez pikseli temel piksel olarak seçmişlerdir [30]. Temel piksel hariç bir blok içerisinde yer alan her bir piksel temel pikselden çıkarılarak bu piksellere ait doğrusal öngörü hatası değeri hesaplanır. Bu hesaplama tüm bloklar için tekrarlanır. Tüm bloklar için hesaplama işlemi bittiğinde öngörü hatası görüntüsü oluşturulur ve öngörü hatası histogramı elde edilir. Burada bloklarda yer alan temel pikseller damgalama işleminde kullanılmadığından öngörü hatası histogramı oluşturulurken bu piksel değerleri histogramda yer almaz. Başka bir deyişle $n \times n$ boyutlu her blok için $n \times n - 1$ adet öngörü hatası, histogram oluşturulmak için kullanılır. Oluşturulan histogramda maksimum nokta tespit edilerek bu nokta damga eklemek için kullanılır. Tek bir maksimum nokta seçimi yan bilgiler dahil damga ekleme için yetersiz kalıyorsa HD yönteminde birden fazla maksimum nokta seçimi yapılarak damga ekleme işlemi gerçekleştirilir.

Şekil 3.2. (a)'da 5×5 boyutunda örnek bir görüntü kesiti ele alınmıştır. Bu görüntü kesiti için (3,3) koordinatındaki 5 pikseli temel piksel olarak seçilmiştir. Tüm pikseller bu temel pikselden çıkarılarak Şekil 3.2. (b)'de görülen doğrusal öngörü hatası elde edilir. Bu hata görüntüsünün histogramında iki tepe noktası ve minimum nokta (1,3) ve (-1,-3)'dür. Eklenecek damganın (01001101010) olduğu

varsayıldığında bu damga dizisinin doğrusal öngörü hatasına eklenmesi ile de damgalı hata görüntüsü Şekil 3.2.(c) elde edilir. Son olarak da temel piksel değerinin damgalı hata değerlerine eklenmesi ile de Şekil 3.2.(d) yer alan damgalı görüntü elde edilmiş olur.

5	6	6	6	7
5	5	6	6	6
3	3	5	5	0
1	2	2	2	2
1	2	3	3	1

(a)

0	1	1	1	2
0	0	1	1	1
-2	-2	5	0	-5
-4	-3	-3	-3	-3
-4	-3	-2	-2	-4

(b)

0	1	2	1	3
0	0	1	2	2
-1	-1	5	0	-5
-4	-3	-2	-3	-2
-4	-3	-1	-1	-4

(c)

5	6	7	6	8
5	5	6	7	7
4	4	5	5	0
1	2	3	2	3
1	2	4	4	1

(d)

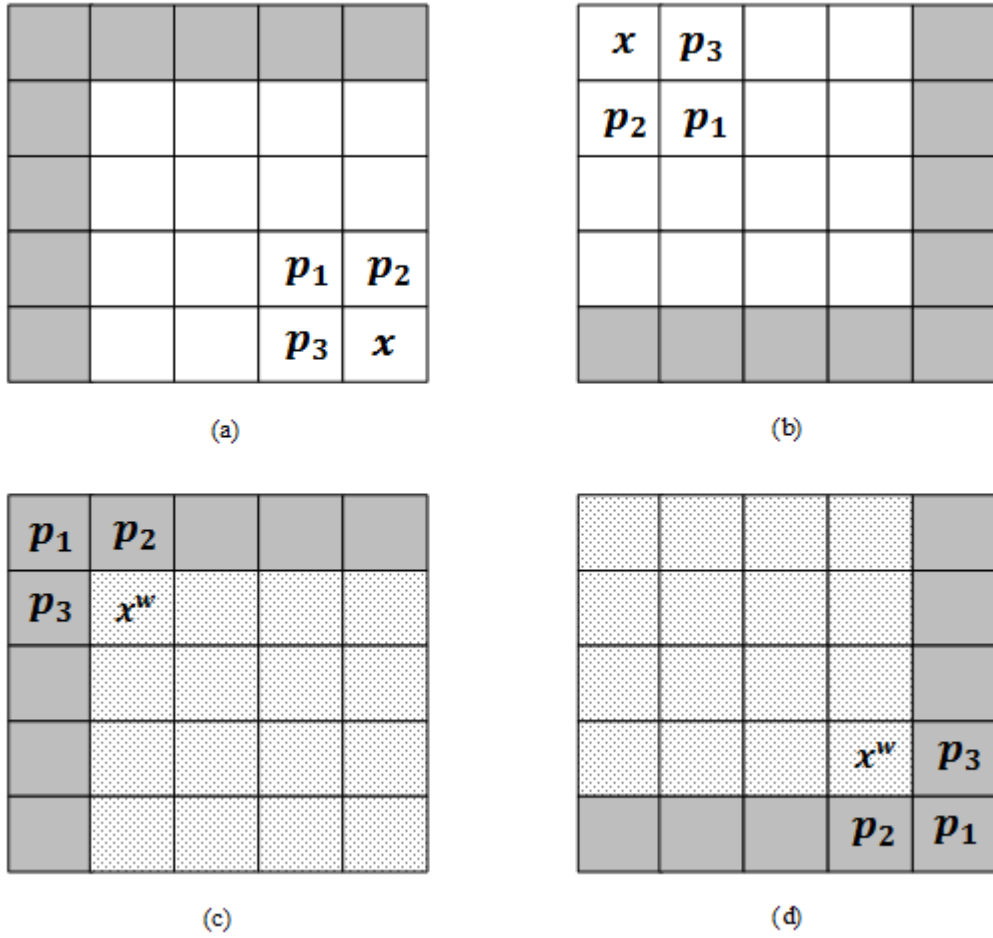
Şekil 3.2. (a) 5×5 boyutunda orijinal görüntü parçası (b) Doğrusal öngörü hatası hesaplanmış görüntü parçası (c) Damgalanmış doğrusal öngörü hatalı görüntü parçası (d) Damgalanmış görüntü parçası

3.3. Ortanca Kenar Dedektörü Öngörü Yöntemi

Ortanca kenar dedektörü (MED-median edge detector) öngörü yöntemi ilk olarak Weinberger ve arkadaşları tarafından düşük karmaşık kayıpsız görüntü sıkıştırma algoritmasında (LOCO-I low Complexity lossless compression for images) kullanılmıştır [44]. Yine Weinberger ve arkadaşları yaptıkları diğer bir çalışmada bu yöntemi JPEG-LS standardında da kullanmışlardır [45]. MED öngörü yönteminin

TGD alanında ilk kullanımı ise Thodi ve Rodrigues [36,37] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yöntem ile hesaplama yapılırken algoritmanın başlangıç noktasına göre alt ve yan piksel komşulukları ya da üst ve yan piksel komşulukları arasındaki ilintiden yararlanır. MED öngörü yönteminde tersinirliğin sağlanıp, damga çözümü sırasında da aynı öngörü değerlerinin elde edilebilmesi için görüntüye ait bir satır ve bir sütun üzerinde işlem yapılmaz. Öngörü hesaplama işlemine görüntünün ilk satır ve ilk sütundan başlanacaksa son satır ve son sütun, son satır ve son sütundan başlanacaksa ilk satır ve ilk sütun işlem yapılmadan bırakılır. Bu sayede damgalı görüntüde aynı öngörü değerlerinin elde edilmesiyle beraber, orijinal görüntü ve damga da kayıpsız olarak geri elde edilmiş olur. Aşağıda Şekil 3.3. (a) da MED öngörü yönteminin x pikseli için hesaplanması sol, üst ve sol üst koşulluklar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3.(b) de ise öngörü hesaplama işlemi alt, sağ ve sağ alt komşuluklar kullanılarak yapılmıştır. Her iki şekilde de koyu renkli pikseller damgalı görüntüden aynı öngörü değerlerini elde etmek için işlem yapılmadan bırakılan pikselleri göstermektedir. Şekil 3.3. (a) ve Şekil 3.3. (b)'de yer alan örnek görüntü kesitleri için MED hesaplama yöntemi aşağıda verilmiştir.

$$\hat{x} = \begin{cases} \min(p_2, p_3), & p_1 \geq \max(p_2, p_3) \\ \max(p_2, p_3), & p_1 \leq \min(p_2, p_3) \\ p_2 + p_3 - p_1, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (3.1)$$



Şekil 3.3. (a) Görüntünün sağ alt köşesinden başlanan MED öngörü hesaplama (b) Görüntünün sol üst köşesinden başlanan MED öngörü hesaplama (c) MED öngörü hesaplama işlemi sağ alt köşeden başlanıp damgalanan görüntü için damga çözümü (d) MED öngörü hesaplama işlemi sol üst köşeden başlanıp damgalanan görüntü için damga çözümü

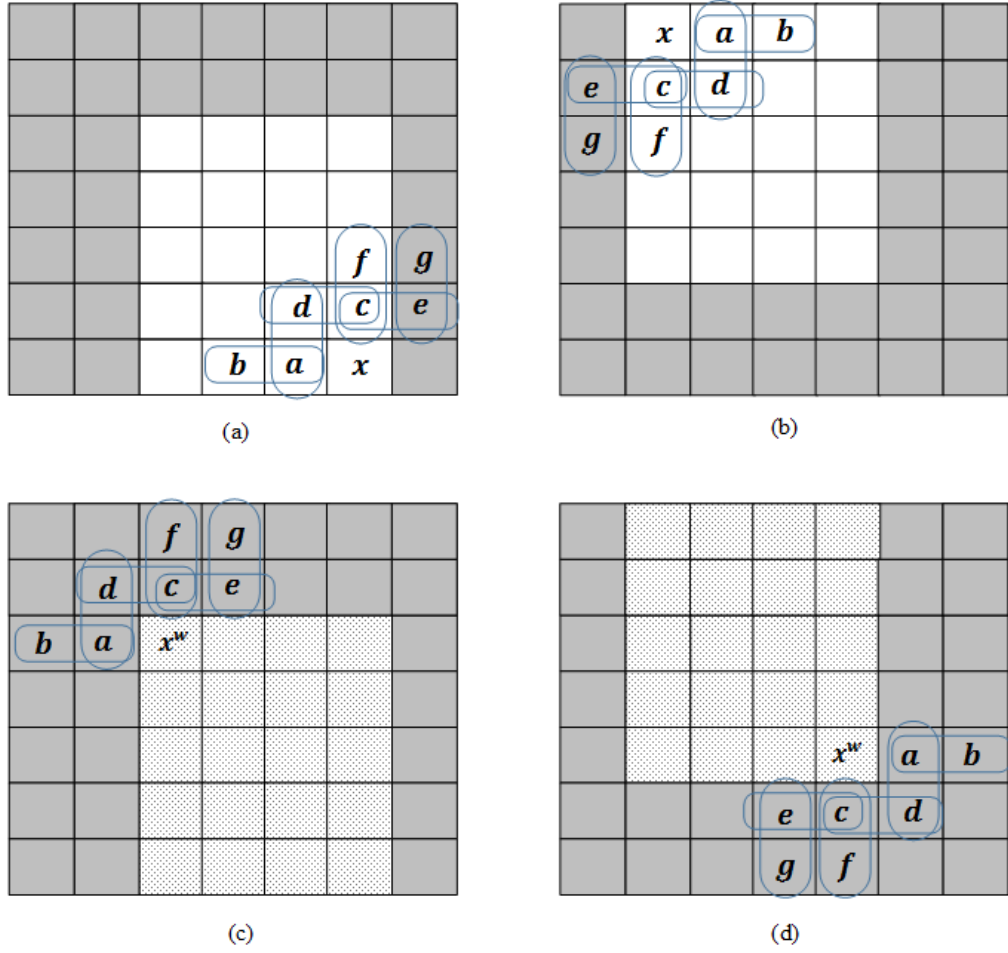
Öngörü değeri bulunan piksellere ait öngörü hatası $e = x - \hat{x}$ formülü ile hesaplanarak ÖH histogramı oluşturulur. Oluşturulan öngörü hatası histogramında HD yöntemi ile hata değerlerine damga ekleme işlemi gerçekleştirilir. Elde edilen damgalı hata değerleri öngörü değerlerine eklendiğinde damgalı görüntü elde edilmiş olur. ($x^w = e^w + \hat{x}$)

Damga çözümü damgalama işleminin tersi yönde gerçekleştirilir. Damgalamanın yönüne bağlı olarak, orijinal görüntüde Denklem (3.1) ile elde edilen öngörü değerleri damgalanmış görüntüden de aynı şekilde elde edilir. Böylece damgalı hata değeri ($e^w = x^w - \hat{x}$) ve bunun sonucunda damga ve orijinal görüntü de HD yönteminin damga çıkarma adımları ile elde edilmiş olur.

3.4. Gradyan Ayarlamalı Öngörü Yöntemi

Gradyan ayarlamalı öngörü yöntemi (GAP-gradient adjusted predictor) ilk olarak durum temelli uyarlanırlı kayıpsız görüntü kodlama (CALIC-context based, adaptive, lossless image coding) algoritmasında kullanılmıştır [21]. Bu öngörü yönteminin TGD alanında ilk kullanımı Fallahpour [48] tarafından gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Coltic [49], Li ve arkadaşları [43] da bu yöntemi çalışmalarında kullanmışlardır. GAP yöntemi MED yöntemine göre görüntü tahmininde daha fazla komşuluktan yararlanmaktadır. Yöntem ile öngörü hesaplama işlemi, bir piksele ait yatay ve dikey yönlü piksel yoğunluk ilişkilerine göre bir başka ifade ile komşu pikseller arasındaki yatay ve dikey türev değerlerine göre olmaktadır. Şekil 3.4.'de verilen görüntü kesitlerinde x pikseline ait öngörü değerinin hesaplanması için kullanılacak komşu pikseller gösterilmiştir.

Damga çözümü sırasında aynı öngörü değerinin elde edilip tersinirliğin sağlanması için bu yöntemde de MED öngörü yönteminde olduğu gibi bazı satır ve sütunların damgalama işlemine katılmadan, damgalı görüntü de orijinal hali ile bırakılması gerekmektedir. Öngörü hesaplama işleminin görüntü üzerindeki başlangıç noktasına göre işlem yapılmadan bırakılan satır ve sütunlar değişmektedir. Şekil 3.4.'te yer alan görüntü kesitlerinde işlem yapılmadan bırakılan satır ve sütunlara ait pikseller koyu renkle gösterilmiştir. Şekil 3.4. (a) da görüntünün sağ alt köşesinden görüntünün sol üst köşesine doğru sağdan sola ve aşağıdan yukarıya doğru bir hesaplama yapılırken, Şekil 3.4.(b) de bu işlem görüntünün sol üst köşesinden sağ alt köşesine doğru soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğrudur. Bu görüntülere ait damga çözümüne ait görüntü örnekleri de sırasıyla Şekil 3.4.(c) ve Şekil 3.4.(d) de verilmiştir.



Şekil 3.4. (a) Görüntünün sağ alt köşesinden başlanarak GAP öngörüsü hesaplama (b) Görüntünün sol üst köşesinden başlanarak GAP öngörüsü hesaplama (c) GAP öngörü hesaplama işlemi sağ alt köşeden başlanıp damgalanan görüntü için damga çözümü (d) GAP öngörü hesaplama işlemi sol üst köşeden başlanıp damgalanan görüntü için damga çözümü

Şekil 3.4. (a) ve Şekil 3.4. (b) örnek görüntülerinde yer alan x pikseli için GAP öngörü hesaplama yöntemi aşağıda verilmiştir. İlk olarak hesaplama yapılacak x pikseline ait yoğunluk fonksiyonunun yatay ve dikey türevleri aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$d_y = |a - b| + |c - d| + |c - e| \quad (3.2)$$

$$d_d = |a - d| + |c - f| + |e - g|$$

Gerçek öngörü değerini hesaplamak için başlangıçta belirlenen öngörü ise

$$x' = (a + c)/2 + (e - d)/4 \quad (3.3)$$

Denklem (3.3) ile elde edilir. d_y ve d_d değerleri ile görüntüdeki renk geçişlerinin büyüklüğü ve yönü algılanarak öngörü değeri hesaplamada daha iyi bir performans elde edilmektedir. Hesaplama işleminde kullanılacak tüm değerlerin bulunmasının ardından x pikseline ait öngörü değeri GAP yöntemi ile aşağıdaki eşitlik kullanılarak (Denklem 3.4) ifade edilebilir.

$$\hat{x} = \begin{cases} a & \text{Eğer } d_y - d_d > 80 \\ (x' + a)/2 & \text{Eğer } d_y - d_d \in (32,80] \\ (3x' + a)/4 & \text{Eğer } d_y - d_d \in (8,32] \\ x' & \text{Eğer } d_y - d_d \in [-8,8] \\ (3x' + c)/4 & \text{Eğer } d_y - d_d \in [-32,8] \\ (x' + c)/2 & \text{Eğer } d_y - d_d \in [-80, -32] \\ c & \text{Eğer } d_y - d_d < -80 \end{cases} \quad (3.4)$$

Seçilen hesaplama yönü doğrultusunda Denklem (3.4) ile görüntü üzerinde damgalama işlemi yapılacak tüm piksellerin öngörü değeri ve buna bağlı olarak öngörü hataları hesaplanır ve ÖH histogramı elde edilir. ÖH histogramında HD yöntemine ait damga ekleme algoritması ile damgalı görüntü oluşturulmuş olur.

Damga çözümü, damga ekleme sırasında tercih edilen öngörü hesaplama işleminin tersi yönünde gerçekleştirilir. Damgalanmış görüntüde piksel değerlerine Denklem (3.4) uygulandığında orjinal görüntü ile aynı öngörü değerleri elde edilir. Damgalama için kullanılan her bir görüntü pikselinin damgalı değerinden, elde edilen öngörü değeri çıkarıldığında damgalı hata elde edilir. ($e^w = x^w - \hat{x}$) HD yönteminin damga çıkarma işlemleri uygulanarak damga ve gerçek hata değeri bulunur. Gerçek hata değeri de öngörü değerine eklendiğinde de ($x = \hat{x} + e$) orijinal görüntü elde edilmiş olur.

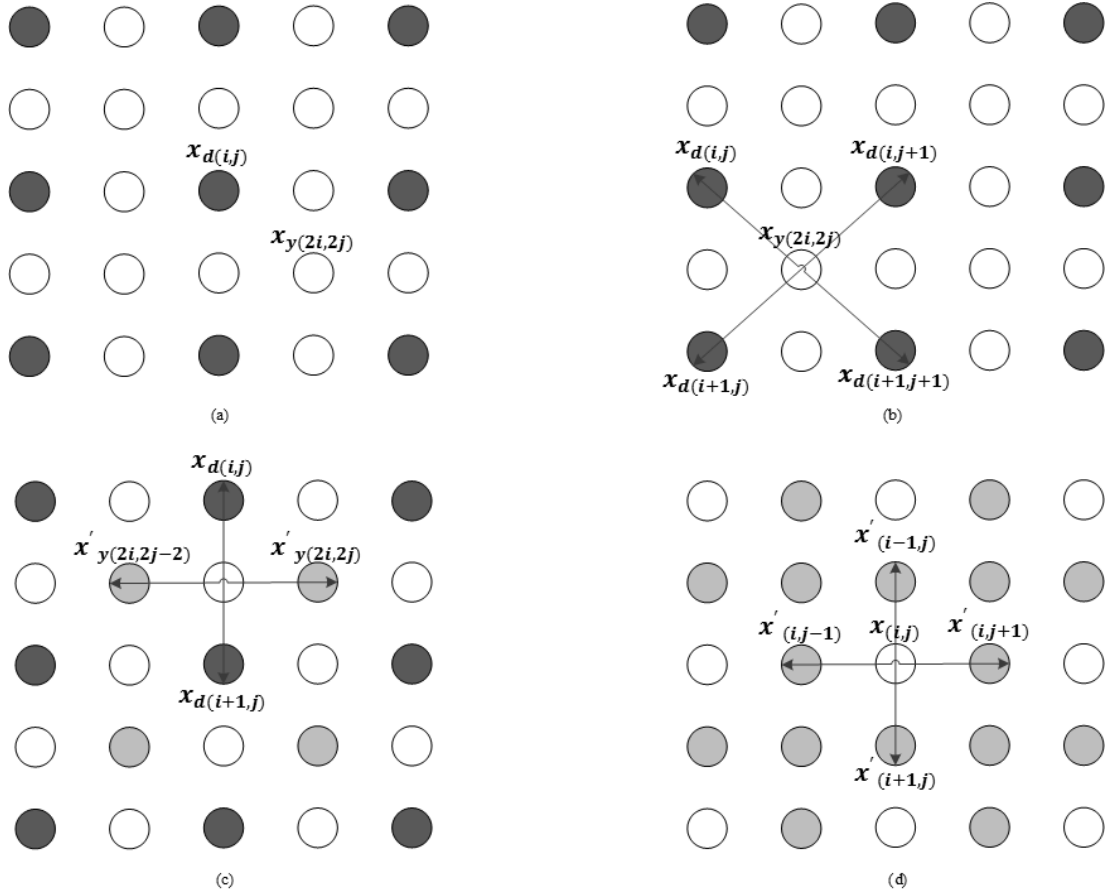
3.5. Aradeğerleme Yöntemi

Düşük çözünürlüklü görüntüden yüksek çözünürlüklü görüntü elde etme işlemi olarak adlandırılan aradeğerleme yönteminde çalışmalar genellikle piksel çoğaltma, bilinear

aradeğerleme, bicubic konvolüsyon aradeğerleme gibi doğrusal yöntemlerde yoğunlaşmıştır [50]. Doğrusal yöntemlerin basitlik ve kolay uygulanabilirliğine karşın, bilgisayar teknolojilerinin gelişimiyle beraber artan hesaplama gücü sayesinde, doğrusal yöntemlerin özellikle kenarlarda iyi sonuçlar vermemesi gibi birtakım eksiklerini gideren yüksek kalitede aradeğerleme algoritmaları geliştirilmiştir. Bu algoritmalarından biri de Zhang ve arkadaşları [51] tarafından geliştirilen, kenar niteliklerini daha iyi koruyan, komşu pikseller arasındaki ilintiyi daha etkin kullanan ve doğrusal aradeğerleme yöntemlerinden daha iyi performans gösteren aradeğerleme yöntemidir. Bu yöntem Luo ve arkadaşları [39] tarafından TGD işlemlerinde kullanılmıştır.

Yukarıda bahsedilen öngörü yöntemlerinde bir piksele ait öngörü değeri o pikseli yarım çevreleyen komşu piksellerden hesaplanırken, aradeğerleme ile bu hesaplama işlemi pikseli tam çevreleyen komşu piksellerden yapılmaktadır [39]. Bu sayede pikseller arasındaki ilinti daha etkin bir şekilde kullanılmakta, yapılan piksel tahmin işlemi orijinal piksel değerine daha yakın sonuçlar vermektedir.

Şekil 3.5.'te yer alan görüntü kesiti örnek bir gösterim için ele alındığında $N \times M$ boyutundaki düşük çözünürlüklü (x_d) piksellerden, kayıp olduğu varsayılan $2N \times 2M$ boyutundaki yüksek çözünürlüklü (x_y) piksellerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu kayıp pikseller elde edilirken komşu pikseller arasındaki ilintiden nasıl yararlanılacağını aradeğerleme algoritması belirlemektedir. Şekilde siyah pikseleler düşük çözünürlüklü, beyaz pikseller yüksek çözünürlüklü ve gri pikseller ise aradeğeri hesaplanmış pikselleri temsil etmektedir.



Şekil 3.5. (a) Görüntü kesitine ait düşük ve yüksek çözünürlüklü pikseller (b) Düşük çözünürlüklü pikselelerden yüksek çözünürlüklü piksellerin elde edilmesi (c) Düşük çözünürlüklü pikseller ile aradeğeri hesaplanan piksellerden aradeğer hesaplama (d) Düşük çözünürlüklü piksellere ait aradeğer hesaplama

Aradeğerleme işlemi yüksek çözünürlüklü ve düşük çözünürlüklü piksellerin aradeğerlerin hesaplanması şeklinde iki kısma ayrılabilir. Yüksek çözünürlüklü piksellerin elde edilmesi de iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk olarak dört düşük çözünürlüklü piksel ile çevreli yüksek çözünürlüklü $x_{y(2i,2j)}$ piksellerin aradeğerleri bulunur. Daha sonra aradeğerleri hesaplanan bu pikseller yardımı ile diğer kayıp pikseller $x_{y(2i-1,2j)}$ ve $x_{y(2i,2j-1)}$ hesaplanır. Son olarak da düşük çözünürlüklü piksellerin aradeğerleri elde edilir.

Aradeğerleme hatası hesaplama işlemine Şekil 3.5.(b) de yer alan yüksek çözünürlüklü kayıp $x_{y(2i,2j)}$ pikselinin 135° ve 45° derecelik iki diyagonal aradeğerinin elde edilmesi ile başlanır.

$$\begin{aligned}\hat{x}_{45} &= (x_{d(i,j+1)} + x_{d(i+1,j)})/2 \\ \hat{x}_{135} &= (x_{d(i,j)} + x_{d(i+1,j+1)})/2\end{aligned}\quad (3.5)$$

Kayıp olduğu varsayılan x_y pikseline ait bu iki yöndeki aradeğerler, bu piksele ait bu yönlerdeki ilintinin etkisi ölçüsünde uygun ağırlık değerleri ile hesaplandığında en iyi aradeğerleme elde edilmiş olur.

$$\begin{cases} \hat{x}_y = w_{45} * \hat{x}_{45} + w_{135} * \hat{x}_{135} \\ w_{45} + w_{135} = 1 \end{cases}\quad (3.6)$$

Yukarıdaki denklemde kullanılan w_{45} ve w_{135} ağırlıkları x_y ' ye ait ortalama karesel hatayı minimize edecek şekilde belirlenmektedir.

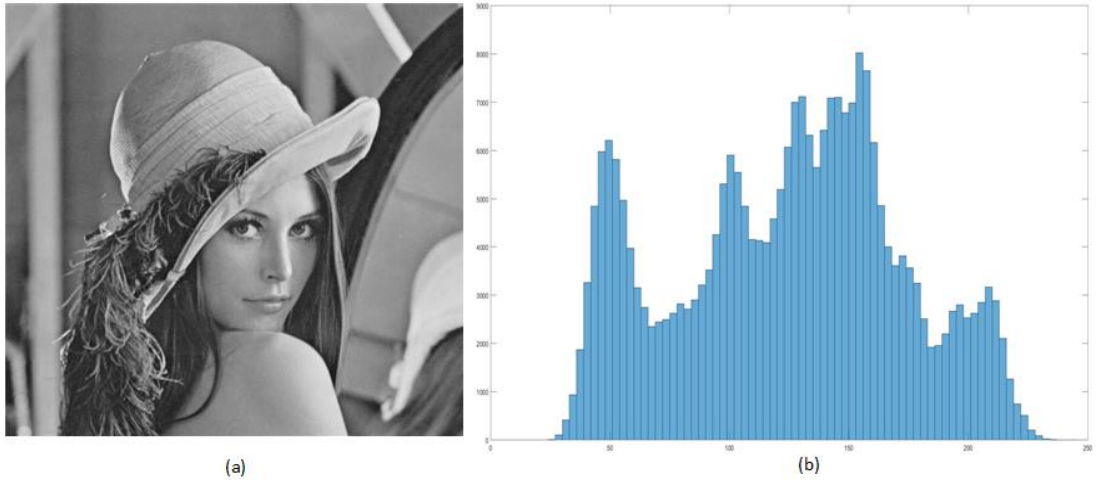
$$\{w_{45}, w_{135}\} = \arg_{w_{45}+w_{135}=1} \min E[(\hat{x}_y - x_y)^2] \quad (3.7)$$

Yüksek çözünürlüklü $x_{y(2i,2j)}$ piksellerine ait hesaplama bittikten sonra $x_{y(2i-1,2j)}$ ve $x_{y(2i,2j-1)}$ piksellerine ait hesaplama işlemine geçilir. Şekil 3.5. (c)'de yer alan beyaz piksellere ait aradeğerleme işlemi, düşük çözünürlüklü siyah pikseller ve yüksek çözünürlüklü aradeğeri hesaplanmış gri piksellerden benzer şekilde hesaplanır. Bu aşamada ilk adımda kullanılan 135° ve 45° 'lık diyagonal aradeğerleme işlemi 0° ve 90° olarak güncellenir. Benzer hesaplama Şekil 3.5. (d)'de yer alan düşük çözünürlüklü piksellere ait aradeğerlenmiş yeni değer elde edilmesi için gerçekleştirilir.

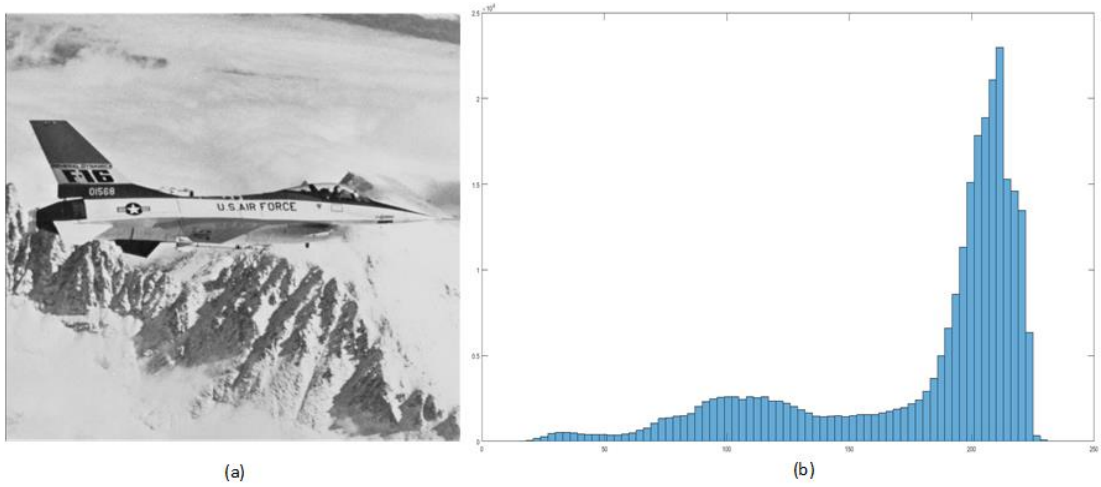
Tüm piksel değerleri için aradeğerleme hataları bulunduktan sonra; e bir piksele ait aradeğerleme hatasını, E ise görüntüye ait tüm aradeğer hatalarını gösteren dizi olmak üzere, E dizisinin histogramında maksimum tepe noktasına sahip iki adet hata değeri SagMax ve SolMax olarak adlandırılarak seçilir. Damgalama işlemi HD yöntemi ile bu iki tepe noktası kullanılarak gerçekleştirilir.

3.6. Hata Değerlerinin Karşılaştırılması

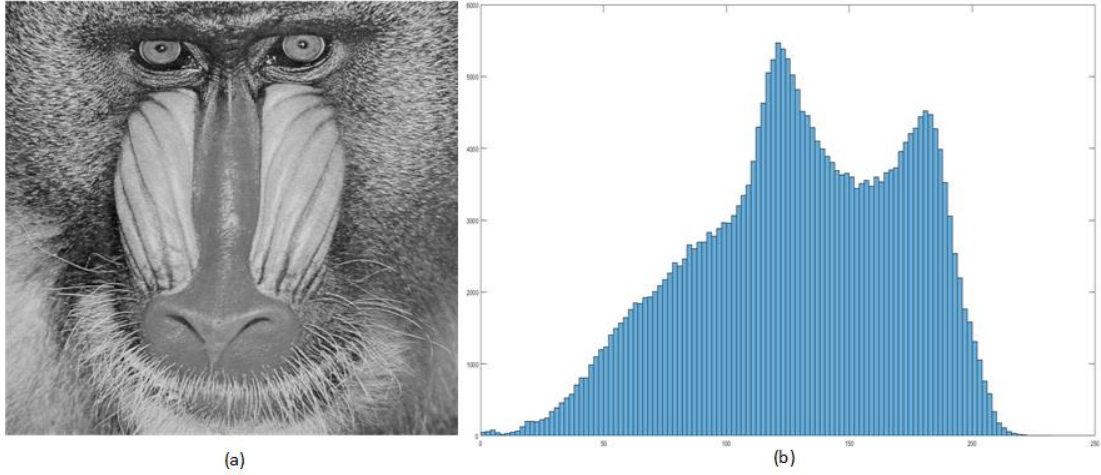
Bu bölümde HDTGD alanında kullanılan ve etkin sonuçlar veren piksel tahmini elde etme yöntemleri ve buna bağlı olarak hesaplanan hata değerleri, TGD yöntemlerinin karşılaştırılmalarında sıklıkla kullanılan histogram dağılımları farklı standart test görüntüleri lena, plane ve baboon üzerinde incelenmiştir. Ayrıca yüz elli adet test görüntüsüne ait değerler analiz edilerek elde edilen sonuçların ortalamaları da bu incelemeye dahil edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla kullanılan test görüntülerinin her biri 512x512 boyutunda gri seviye görüntüdür. Lena, plane ve baboon görüntüleri ve bu görüntülere ait histogram dağılımları sırayla Şekil 3.6., Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. (a) Lena test görüntüsü (b) 512 x 512 boyutunda lena görüntüsüne ait hisistogram

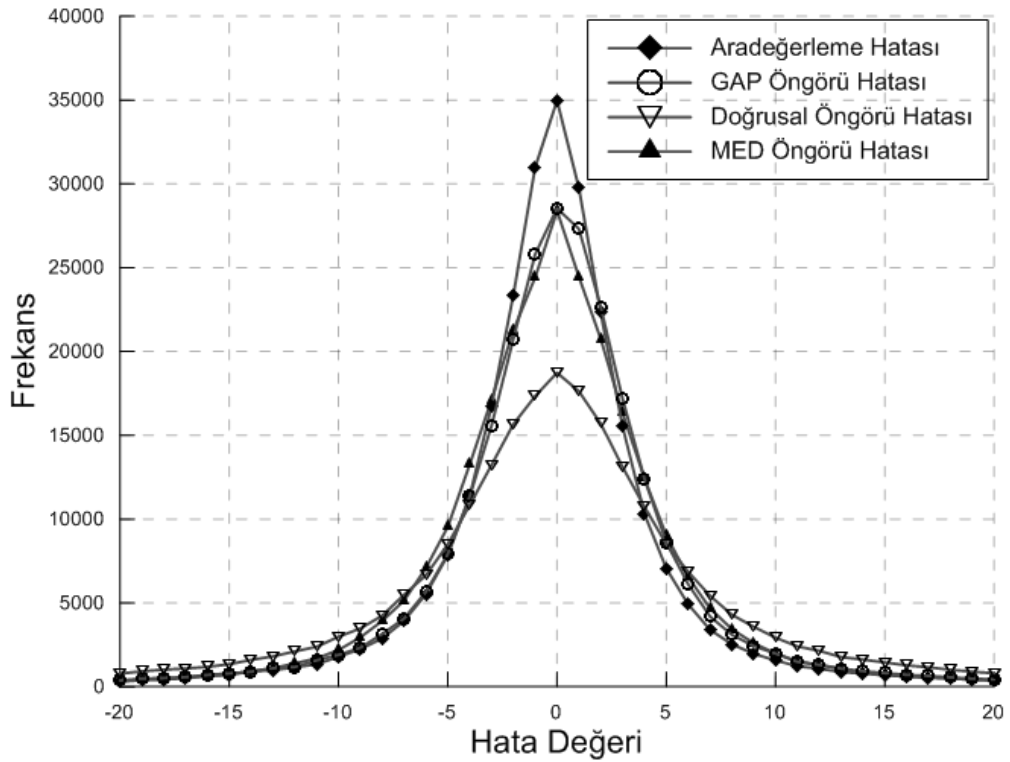


Şekil 3.7. (a) Plane test görüntüsü (b) 512 x 512 boyutunda plane görüntüsüne ait hisistogram

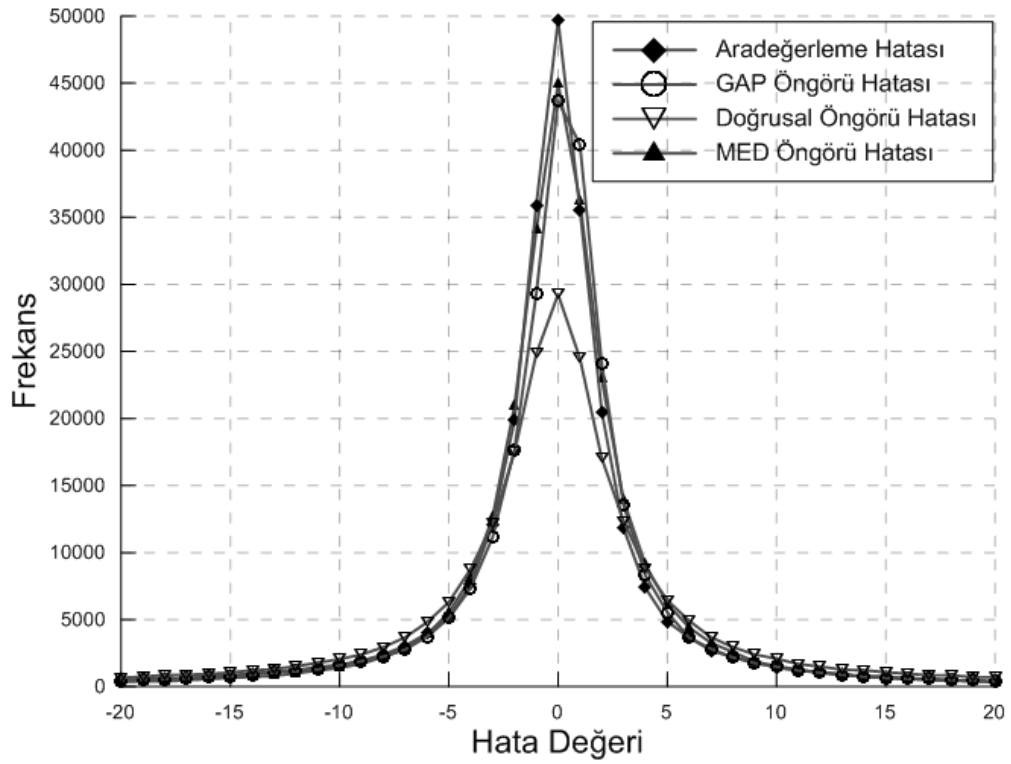


Şekil 3.8. (a) Baboon test görüntüsü (b) 512 x 512 boyutunda baboon görüntüsüne ait histogram

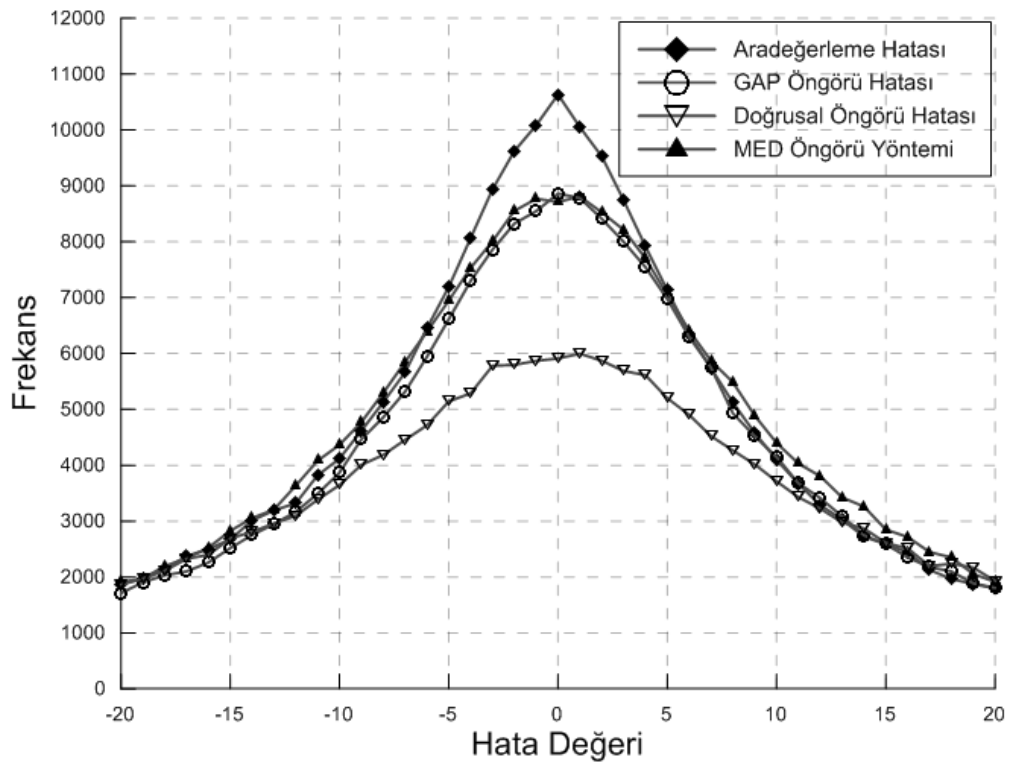
Lena, plane, baboon test görüntülerinde MED, GAP, doğrusal öngörü ve aradeğerleme yöntemleriyle elde edilen tahmini piksel değerlerinin orijinal piksel değerlerinden çıkarılarak oluşturulan hata görüntülerine ait histogram dağılımları sırayla Şekil 3.9., Şekil 3.10. ve Şekil 3.11.'de gösterilmiştir. Literatürde sıklıkla kullanılan yüz elli adet test görüntüsünün hata görüntülerinin ortalamalarına ait histogram da Şekil 3.12.'de verilmiştir.



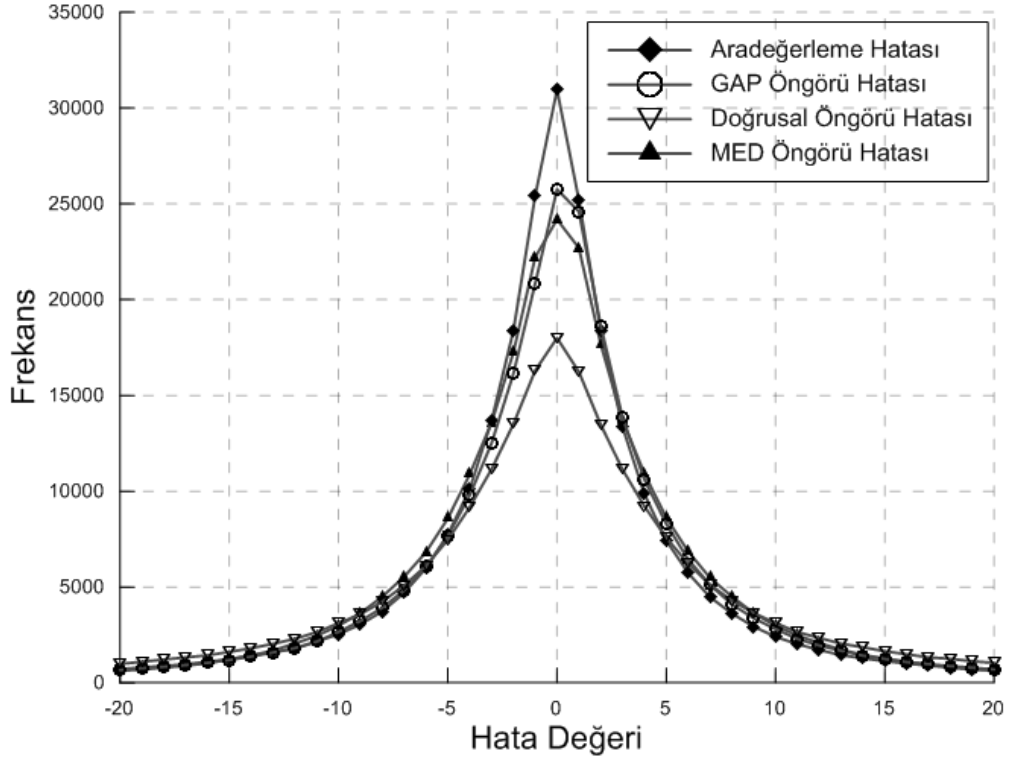
Şekil 3.9. Lena görüntüsüne ait hata histogramları



Şekil 3.10. Plane görüntüsüne ait hata histogramları



Şekil 3.11. Baboon görüntüsüne ait hata histogramları



Şekil 3.12. 150 test görüntüsüne ait elde edilen hata değerlerinin yöntem bazlı ortalamaları

Şekil 3.9.'da yer alan lena görüntüsüne ait hata histogramları incelendiğinde lena görüntüsünde aradeğerleme yönteminin diğer tahmin yöntemlerinden orijinal görüntü değerlerine daha yakın sonuç verdiği tahmin hatası histogramından da anlaşılmaktadır. Lena görüntüsünde tüm tahmin yöntemleri için maksimum frekanslı hata değeri 0'dır ve bu değer aradeğerleme yöntemi için 34973 ile en yüksektir. Aradeğerleme yöntemini sırayla GAP 28536, MED 28391 ve doğrusal öngörü yöntemi 18732 frekans değerleri ile izlemektedir. HDTD yöntemlerinde histogramın tepe noktasının damgalama işlemi için yeterli olmadığı durumlarda, histogramın belirli bölgeleri içerisinde yer alan frekans değerleri toplamı kadar bit damgalama işleminde kullanılabilir. Dolayısı ile kapasite bu frekans değerlerin sayısınca belirlenmektedir. Lena görüntüsü için $[-10,10]$ aralığında yer alan hata değerlerine ait frekans dağılımları incelendiğinde bu aralıkta da toplam frekansın aradeğerleme için 241058 değeri ile en yüksek olduğu bilgisayar benzetimleri ile elde edilmiştir. Sonuç olarak Lena görüntüsü HDTD yöntemleri ile damgalanmak istendiğinde aradeğerleme işlemi daha etkin sonuçlar verecektir. Şekil 3.10.'da hata histogramları karşılaştırılan plane görüntüsü için de benzer durum söz konusudur. Plane görüntüsüne

ait hata frekans dağılımlarında da tüm hata operatörleri için 0 noktası maksimumdur. 0 tepe noktası aradeğerleme için 49712 frekans değerine sahip iken onu sırayla GAP 43676, MED 44997 ve doğrusal öngörü yöntemi 29255 ile elde edilen frekans değerleri izlemektedir. Elde edilen sonuçlara ait hata dağılımları Şekil 3.11.'de yer alan baboon gibi düzensiz piksel dağılımına sahip bir görüntü için ele alındığında da aradeğerleme yönteminin üstünlüğü gözükmemektedir. GAP ve MED yöntemleri baboon görüntüsünde benzer hata dağılımına sahip iken doğrusal öngörü yöntemi ise burada da en düşük başarıma sahiptir. Baboon görüntüsü için $[-10,10]$ aralığında GAP, doğrusal öngörü, MED ve aradeğerleme hatasına ait frekans değerleri toplamı sırayla 137307, 104586, 142548, 149769 değerlerini almaktadır. Yüz elli adet test görüntüsüne ait görüntü hatalarının ortalamaları da Şekil 3.12.'den incelendiğinde tepe noktasındaki frekans değeri aradeğerleme için 30951 ile en yüksektir. $[-10,10]$ aralığında da aradeğerleme yöntemi bu üstünlüğünü korumuştur.

HDTGD yöntemlerinde hata histogramında maksimum noktaya ait frekans değeri yada kapasiteye bağlı olarak maksimum noktayı da içeren bölge içersindeki hata değerlerine ait toplam frekans miktarı, damgalama kapasitesini belirleyen faktörlerdendir. Elde edilen hata histogramlarının genelde 0 ortalama değerli laplacian dağılımına sahip olduğu düşünüldüğünde, düşük hata değerlerinin elde edilmesi varyans değerinin de düşük olmasını sağlayacak bu da hata histogramında maksimum nokta ve maksimum nokta çevresindeki hata değerlerinin frekansını arttırarak hata histogramını daha dik yapacaktır. Bu işlemin de gerçekleşmesi pikseller arasındaki ilintinin ne kadar etkin kullanıldığına bağlı olarak, tahmin işlemi gerçekleştirilen piksel değerine o kadar yakın tahmin değeri elde edilmesiyle mümkün olmaktadır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırma için kullanılan test görüntülerinde aradeğerleme işleminin pikseller arasındaki ilintiyi daha etkin kullandığını, dolayısı ile yapılan görüntü tahmininin diğer öngörü yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Yüz elli adet test görüntüsü kullanılarak elde edilen görüntü hatalarının ortalamaları da; aradeğerleme ile pikseller arasındaki ilintinin daha iyi giderildiğini kanıtlamaktadır.

BÖLÜM 4. BÖLGESEL TABANLI UYARLANABİLİR TERSİNİR GÖRÜNTÜ DAMGALAMA

4.1. Giriş

Bu tezde geleneksel tersinir görüntü damgalama algoritmaları yerine aradeğerleme hatalarının histogramında bölgesel tabanlı, birden fazla hata değerinin damgalandığı yeni bir tersinir görüntü damgalama yöntemi sunulmuştur. Bu yeni yöntemde aradeğerleme hatalarının damgalanmasında uyarlanabilir bir yaklaşım ile hangi piksellerin bir bit hangilerinin birden fazla bit ile damgalanacağına karar verilmiştir. Ayrıca damgalama algoritmasında piksel seçme işlemi uygulanmış, damgalanacak piksellere yer açmak amacıyla öteleme işlemine tabii tutulan piksellerin bir kısmı istenen damga kapasitesi doğrultusunda elemine edilerek ötelenmiş piksel sayısının azaltılması sağlanmıştır. Tüm bunların neticesinde önerilen yöntem ile yapılan damgalama işlemi sonucunda oluşan damgalı görüntü, diğer damgalama yöntemleri kullanılarak elde edilen damgalı görüntüler ile karşılaştırıldığında daha iyi görüntü kalitesi elde edilmiştir.

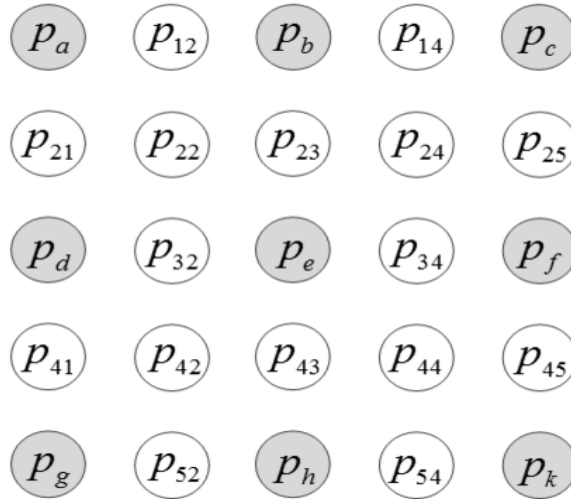
Hataya dayalı tersinir görüntü damgalama (HDTGD) algoritmalarında kapasite-bozunum performansını hataya ait histogramın ve damgalama yönteminin başarımının belirlediğini önceki bölümlerde tartışmıştık. Elde edilen sonuçlar neticesinde aradeğerleme hatalarının damgalama için etkin sonuçlar verebileceği Bölüm 3’de gösterilmiştir. Bu nedenle çalışmada görüntü tahmininde aradeğerleme yöntemi kullanılmış, aradeğerleme hatalarının bölgesel tabanlı uyarlanabilir bir yaklaşımla damgalandığı yeni bir damgalama yöntemi önerilmiştir.

Önerilen yöntemde damgalama stratejisi olarak [43] çalışmasında yer alan yaklaşım kullanılmıştır. Ancak [43] çalışması, aradeğerleme hatalarının damgalanmasında kullanıldığında bazı problemlerle karşılaşmaktadır. Örneğin tersinirliğin sağlanması

için, damga ekleme ve damga çıkarma esnasında aynı aradeğerleme hatalarının elde edilebilmesi, yöntemde kullanılan parametrelerin uyarlanabilir ve uyarlanabilir olmayan pikseller için belirlenmesi gerekmektedir. Yine hangi piksellere uyarlanabilir damgalama yapılacağı hangilerine yapılmayacağı, toplam kapasitenin görüntüye nasıl dağıtılacağı, damga çözmek için gerekli olan bilgilerin damgalı görüntüden nasıl elde edileceği birer problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu problemler sunulan yöntemle ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca eklenecek damga verisine göre görsel kaliteyi daha etkin kontrol etmek için birden fazla kapasite parametresi kullanılarak [43]'de yer alan metod iyileştirilmiştir. Son olarak önerilen yöntemin başarımı literatürde var olan diğer yöntemler ile karşılaştırılmış ve daha iyi sonuçlar verdiği bilgisayar benzetimleri ile gösterilmiştir.

4.2. Aradeğerleme Hatalarının Elde Edilmesi

Önerilen yöntemde Zhang ve arkadaşları [51] tarafından sunulan aradeğerleme algoritması kullanılmıştır. HDTGD algoritmaları diğer geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında iki önemli avantaja sahiptir. Bunlardan ilki tüm piksel değerleri veri saklama işlemi için kullanılabilir. Örneğin Tian [14] metodunda komşu pikseller arasındaki fark genişletilmektedir. Bu da toplam piksel sayısının yarısı kadar piksel değerine ait fark değerlerinin genişletileceği anlamına gelir. Örneğin $N \times M$ 'lik bir görüntü için maksimum damgalama kapasitesi teorik olarak $(N \times M)/2$ olabilmektedir, yani damgalama kapasite yarıya düşmektedir. HDTGD algoritmalarının ikinci avantajı ise komşu pikseller arasındaki ilintinin görüntü tahmininde daha etkin kullanılmasıyla hata değerinin minimize edilmeye çalışılmasıdır. Bu da piksel tahmininde iyi sonuç üreten aradeğerleme yöntemi ile daha etkin olmaktadır. Bu etkinlik sayesinde aradeğerleme hatalarının histogramı öngörü hatalarının histogramından daha dik olmaktadır. Bunun sonucu olarak damgalama kapasitesi artacaktır.



Şekil 4.1. Örnek bir görüntü kesiti için örneklenmiş ve örneklenmemiş pikseller

Şekil 4.1.'de örnek bir görüntü kesiti için aradeğerleme hatalarının nasıl hesaplandığı ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Şekilde yer alan 5×5 görüntü kesiti için harfli indekse sahip pikseller “örneklenmiş” ($P_a, P_e, P_b, P_d \dots$) diğerleri “örneklenmemiş” ($P_{22}, P_{24}, P_{42}, P_{44} \dots$) olarak iki kısma ayrılmıştır. Hesaplama işlemi ilk olarak örneklenmiş piksellerden örneklenmemiş piksellerin tahmini değerlerinin elde edilmesi ile başlar daha sonra da bu elde edilen piksel değerleri de hesaplama işlemine katılarak hesaplama yapılmayan örneklenmemiş piksellerin aradeğerleri elde edilir. Örneğin P_{22} pikseline ait aradeğerlenmiş yeni değer bu piksele en yakın örneklenmiş P_a, P_e, P_b, P_d piksellerinden elde edilmektedir. Şekil 4.1.'de yer alan (P_a, P_e) ve (P_b, P_d) piksel değerlerine ait köşegen yönlü ortalama ile elde edilen aradeğerler Mp_{ae} ve Mp_{bd} ve bu aradeğerlere ait hata değerleri e_{ae} , e_{bd} aşağıdaki formüllerle elde edilir.

$$\begin{aligned} Mp_{ae} &= (P_a + P_e)/2, & e_{ae} &= MP_{ae} - P_{22} \\ Mp_{bd} &= (P_b + P_d)/2, & e_{bd} &= MP_{bd} - P_{22} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Herhangi bir örneklenmemiş piksel için aradeğerleme işlemi yapılırken hesaplama için kullanılan örneklenmiş piksellerin bu piksel üzerindeki etkisi daha fazla olabilir. Bunun için köşegen yönlü aradeğerleme işleminde ağırlık belirleyerek hesaplama yapmak daha iyi tahmin değeri elde edilmesini sağlar. Denklem (4.4)'te yer alan $\sigma(e_{ae})$ ve $\sigma(e_{bd})$, sırayla e_{ae} ve e_{bd} 'ye ait varyans değerleridir ve aradeğerleme

işleminde ağırlık belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Örneğin P_{22} pikseline ait aradeğerleme hesabı yapılmak istendiğinde, $\sigma(e_{ae})$ değerinin $\sigma(e_{bd})$ değerinden büyük olduğu bir senaryo için Mp_{ae} 'nin aradeğerleme sonucuna etkisi Mp_{bd} 'den daha az olacaktır. Denklem (4.2)'de yer alan u değeri örneklenmiş piksellerin ortalama değerini göstermek üzere $\sigma(e_{ae})$ ve $\sigma(e_{bd})$ varyans değerleri Denklem (4.3) ile hesaplanır.

$$u = \frac{P_a + P_b + P_d + P_e}{4} \quad (4.2)$$

$$\sigma(e_{ae}) = \frac{1}{3} \sum_{l=1}^3 (K_{ae}(l) - u), \quad \sigma(e_{bd}) = \frac{1}{3} \sum_{l=1}^3 (K_{bd}(l) - u) \quad (4.3)$$

$K_{ae} = \{P_a, P_e, Mp_{ae}\}$ ve $K_{bd} = \{P_b, P_d, Mp_{bd}\}$ olmak üzere P_{22} pikseline ait ara değerlenmiş piksel değeri aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

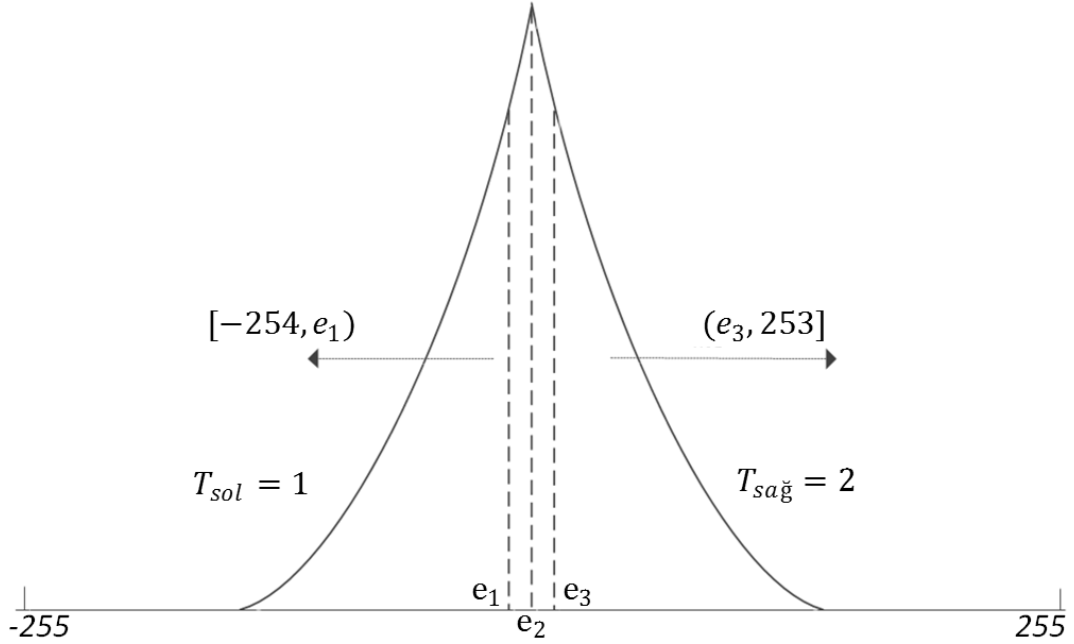
$$\hat{P}_{22} = \frac{\sigma(e_{bd})}{\sigma(e_{bd}) + \sigma(e_{ae})} Mp_{ae} + \frac{\sigma(e_{ae})}{\sigma(e_{bd}) + \sigma(e_{ae})} Mp_{bd} \quad (4.4)$$

Köşegen yönde hesaplaması yapılabilen tüm örneklenmemiş piksellere ait aradeğerlenmiş yeni pikseller yukarıdaki formüllerle benzer biçimde elde edilir. Köşegen yönlü hesaplama işlemi bittiğinde yeni değerleri elde edilen örneklenmemiş pikseller ile örneklenmemiş pikseller için hesaplama işlemine devam edilir. Örneğin P_{23} pikseline ait aradeğerleme işlemi; P_{22}, P_{24} piksellerine ait $\hat{P}_{22}, \hat{P}_{24}$ ile gösterilen aradeğerlenmiş yeni değerlerden ve P_b, P_e örneklenmemiş piksellerden benzer şekilde elde edilir. Burada tek fark Denklem (4.1)'de köşegen yönlü hesaplanan aradeğerleme, dikey ve yatay yönlü olarak sırayla P_b, P_e ve $\hat{P}_{22}, \hat{P}_{24}$ piksel çiftlerinin bu hesaplamada ve Denklem (4.2)'de ortalama hesabında kullanılması ile revize edilir. Tüm örneklenmemiş pikseller için aradeğerleme hesaplandıktan sonra örneklenmiş piksellere ait hesaplama işlemine geçilir. Örneğin P_e pikselinin aradeğeri kendini çevreleyen aradeğeri hesaplanmış örneklenmemiş piksel çiftlerinden yine dikey ($\hat{P}_{23}, \hat{P}_{43}$) ve yatay ($\hat{P}_{32}, \hat{P}_{34}$) yönlü olarak hesaplanır. Tüm bu işlemler sonucunda aradeğerleme işlemi gerçekleştirilmiş olur.

4.3. Bölge Tabanlı Aradeğerleme Hatası Genişletme

ÖHG tabanlı TD yöntemlerinde damgalama kapasitesini, kapasite parametresi t belirlemektedir ve öngörü hatası histogramında $[-t, t)$ arasında kalan hata değerleri damgalama için kullanılmaktadır. Damgalama işleminde istenen kapasiteye ulaşılan kadar t iteratif bir şekilde arttırılmaktadır. t 'nin her artışı ile kapasite artışı sağlanırken, kapasite istenenden fazla bir şekilde artmakta bu da görüntü kalitesini düşürüp, damgalı görüntü üzerindeki bozunumu arttırmaktadır. Kapasite miktarını ve görüntü kalitesini daha hassas bir şekilde kontrol etmek ve hedef kapasite değerine daha yaklaşık bir sonuca ulaşmak için önerilen yöntemde iki farklı kapasite parametresi kullanılmıştır. Önerilen yöntemde aradeğerleme hatalarına ait histogram değerleri Sol histogram (SolHist) ve sağ histogram (SağHist) olarak iki ayrık kümeye ayrılmıştır. Bu iki ayrık kümede $[-255, -1]$ değerleri SolHist geri kalan değerler SağHist bölgesine ait değerlerdir. SolHist ve SağHist bölgeleri için kapasite parametreleri sırasıyla T_{sol} ve $T_{sağ}$ olarak belirlenip, aradeğerleme hatası histogramında $[-T_{sol}, T_{sağ}]$ arasında kalan pikseller iç bölge, diğer pikseller dış bölge olarak adlandırılmıştır. Görüntüye eklenebilecek maksimum bilgi miktarını T_{sol} ve $T_{sağ}$ kapasite parametrelerince belirlenen iç bölgedeki piksel sayısı belirlemektedir. Şekil 4.2.'de $T_{sol} = 1, T_{sağ} = 2$ olduğu durumda oluşacak senaryo görülmektedir. SolHist bölgesinde hata değeri $e_1 = -1$ olan pikseller damgalanırken, hata değeri $[-254, e_1)$ olan pikseller ötelenir. Benzer şekilde SağHist bölgesinde hata değeri $e_2 = 0$ ve $e_3 = 1$ olan pikseller damgalanırken, hata değeri $(e_3, 253]$ olan pikseller ötelenmektedir. Ancak T_{sol} ve $T_{sağ}$ parametrelerindeki artış görüntü kalitesinde bozulmalara yol açar. Bu parametreler hedef kapasitesine ulaşmak için yinelemeli bir algoritma ile tespit edilir. Görüntü üzerinde (i, j) pozisyonuna ait $x(i, j)$ ile ifade edilen gri seviye bir pikselin aradeğerlenmiş yeni değerinin $\hat{x}(i, j)$ olduğu düşünülürse SolHist ve SağHist bölgeleri için genelleştirilmiş veri damgalama formülü aşağıdaki şekilde ifade edilebilir. Formülde $x^w(i, j)$, damgalanmış piksel değerini göstermektedir.

$$x^w(i, j) = \begin{cases} x(i, j) + e + b & , -T_{sol} \leq e < T_{sağ} \\ x(i, j) + T_{sağ} & , T_{sağ} \leq e \\ x(i, j) - T_{sol} & , e < -T_{sol} \end{cases} \quad (4.5)$$



Şekil 4.2. $T_{sol} = 1$ ve $T_{sağ} = 2$ değeri için sol bölgede $e_1 = -1$, sağ bölgede $e_2 = 0$ ve $e_3 = 1$ değerlerinin damgalamada kullanılabileceği örnek bir hata histogramı gösterimi

SolHist ve SagHist bölgelerine ait T_{sol} ve $T_{sağ}$ parametreleri kapasite parametre belirleyici bir değişkenin (k) istenen kapasite doğrultusunda iteratif olarak artırılması ile elde edilir. Burada $[.]$ pozitif yönde sonsuzluğa doğru en yakın tamsayı değerine yuvarlama işlemini gösteren bir operatör olarak kullanılmaktadır. T_{sol} ve $T_{sağ}$ kapasite parametrelerinin 0-255 aralığında yer alması için k değeri de 0-509 aralığında yer almalıdır.

$$T_{sol} = \left\lfloor \frac{k}{2} \right\rfloor, T_{sağ} = \left\lceil \frac{k+1}{2} \right\rceil \quad (4.6)$$

Kapasite parametre belirleyici olarak kullanılan k değişkeninin bazı örnek değerleri için $T_{sol}, T_{sağ}$ kapasite parametreleri ve damgalama işleminde kullanılmaya aday aradeğerleme hatası değerleri Tablo 4.1.'de gösterilmiştir. Örneğin $k = 4$ değeri için $T_{sol} = 2$ ve $T_{sağ} = 3$ olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda SolHist bölgesinde

$\{-1, -2\}$, SagHist bölgesinde ise $\{0,1,2\}$ hata değerli pikseller damgalama işleminde kullanılmaya aday olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.1. Kapasite parametrelerine göre damgalama işleminde kullanılabilir aradeğerleme hatalarının belirlenmesi

k	T_{sol}	$T_{sağ}$	Seçilen Hata Değeri	
			Sol Bölge	Sağ Bölge
1	1	1	-1	0
2	1	2	-1	0 1
3	2	2	-2 -1	0 1
4	2	3	-2 -1	0 1 2
5	3	3	-3 -2 -1	0 1 2
6	3	4	-3 -2 -1	0 1 2 3
7	4	4	-4 -3 -2 -1	0 1 2 3

4.4. Piksel Sınıflandırma ve Uyarlanabilir Damgalama

Geleneksel tersinir damgalama yöntemlerinde damgalama kapasitesi ve damgalanmış görüntü üzerinde meydana gelen bozunum; bu yöntemlerin değerlendirilmesi için temel özelliklerdendir. Literatürde yer alan bir çok tersinir görüntü damgalama algoritmasının tek seviye damgalama işleminde ulaşabileceği maksimum damgalama kapasitesi 1 bpp olmaktadır. Bu algoritmalarda 1 bpp'lik damgalama seviyesinin üzerinde çıkılması ancak damgalı görüntü üzerinde tekrar damgalama işleminin yapılmasıyla gerçekleşmektedir. Çoklu seviye damgalama olarak adlandırılan bu damgalama işlemi gerçekleştirildiğinde ise görüntü üzerinde bozunum oldukça artmaktadır. Son yıllarda ortaya atılan uyarlanabilir damgalama yaklaşımı ile tek seviye damgalama işlemlerinde damgalama kapasitesi 1'bpp'nin üzerine çıkmaktadır. Uyarlanabilir damgalama stratejisinin temel fikri görüntü üzerinde bazı piksel değerlerinin seçilerek bu piksellere birden fazla bit damgalama yapmak üzerine kurulmuştur. Uyarlanabilir yaklaşım ile birden fazla bit ile damgalama yapılan pikseller, bir bit ile damgalama yapılan piksellerden damgalanmış görüntüde daha az bozunum oluşturmaktadır. Böylece görüntü kalitesi korunarak daha iyi bir damgalama performansı elde edilmektedir.

Uyarlanabilir damgalama stratejisi ilk olarak Kamstra and Heijmans [52] tarafından FG yönteminde, komşu piksel çiftlerinin yerel varyans değerlerine göre sınıflandırılıp damgalama performansının geliştirilmesi biçiminde kullanılmıştır. Daha sonraları ÖHG teknikleri ile uyarlanabilir damgalama stratejisinin birleştirildiği ve damgalama performansının artırıldığı çalışmalar gerçekleştirilmiştir [40,43,53-56].

Önerilen yöntemde uyarlanabilir damgalama stratejisi aradeğerleme hatalarına ilk kez uygulanmıştır. Aradeğerleme hatası genişletme [39] damgalama yönteminde kapasite artışına bağlı olarak damgalama işleminde kullanılan hata değerleri büyümektedir. Bu büyük hata değerlerinin damgalama işleminde kullanılması damgalı görüntüde bozunumu arttırmakta, görsel kaliteyi ise azalmaktadır. Görsel kalitenin korunması için yüksek aradeğerleme hatasına sahip piksellerin damgalanmayıp, düşük aradeğerleme hatasına sahip piksellerin daha fazla bit ile damgalanması daha iyi sonuçlar verecektir.

Geleneksel hataya dayalı damgalama yöntemlerinde bir bit damgalama yapıldığında hata değerine ait LSB biti damga saklamak için kullanılmaktadır. Bu durum aradeğerleme hatalarının damgalanmasında kullanıldığında damgalı hata değeri $e^w = 2e + b$ olarak hesaplanır. Damgalı pikselin ise Denklem 2.25'ten $x^w = \hat{x} + e^w$ olarak elde edildiğini biliyoruz. Burada aradeğerlenmiş piksel değeri ($\hat{x} = x - e$) Denklem 2.25'te yerine yazıldığında damgalanmış piksel değeri $x^w = x - e + 2e + b = x + e + b$ olur. Bu durum görüntü üzerinde $e + b$ kadar bir bozunum oluşturacaktır. Hata değerine bir bit yerine iki bit damga saklayacağımızı düşünelim. Bu durumda geleneksel hataya dayalı damgalama yöntemlerinde bir bitin saklanması için hata değerine ait en düşük anlamlı bitin (LSB) kullanılması, iki bit damgalama işleminde hataya ait en düşük anlamlı iki bitin kullanılması olarak düşünülebilir. İki bit damgalama gerçekleştirmek için damga bitleri b_1 ve b_2 olsun. Bu iki bit için damgalı hata değeri $e^w = 2(2e + b_1) + b_2 = 4e + 2b_1 + b_2$, damgalı piksel değeri ise $x^w = x - e + 4e + 2b_1 + b_2 = x + 3e + 2b_1 + b_2$ olarak hesaplanır. Bu durumda da görüntü üzerinde oluşan bozunum $3e + 2b_1 + b_2$ olmaktadır. Kapasite parametresi doğrultusunda hata değeri e 'nin alabileceği farklı değerler için teorik olarak iki bit damgalamada oluşan bozunumun ($3e + 2b_1 + b_2$)

bir bit damgalamada oluşan bozunumdan ($e + b$) daha düşük olduğu değerler uyarlanabilir damgalama stratejisinin aradeğerleme hatalarında uygulanmasının temel felsefesini oluşturmuştur. Tablo 4.2.'de bazı örnek hata değerlerine bir bit ve iki bit damgalama yapıldığında bu hata değerlerinin görüntü üzerinde oluşturacağı bozunumlar (D) gösterilmiştir.

Tablo 4.2.Örnek hata değerlerine 1 bit ve 2 bit damgalama yapıldığında oluşan bozunum miktarları

e	1 bit damgalama ile oluşan bozunum (D)		2 bit damgalama ile oluşan bozunum (D)			
	0	1	00	01	10	11
-5	-5	-4	-15	-14	-13	-12
-4	-4	-3	-12	-11	-10	-9
-3	-3	-2	-9	-8	-7	-6
-2	-2	-1	-6	-5	-4	-3
-1	-1	-0	-3	-2	-1	0
0	0	1	0	1	2	3
1	1	2	3	4	5	6
2	2	3	6	7	8	9
3	3	4	9	10	11	12
4	4	5	12	13	14	15

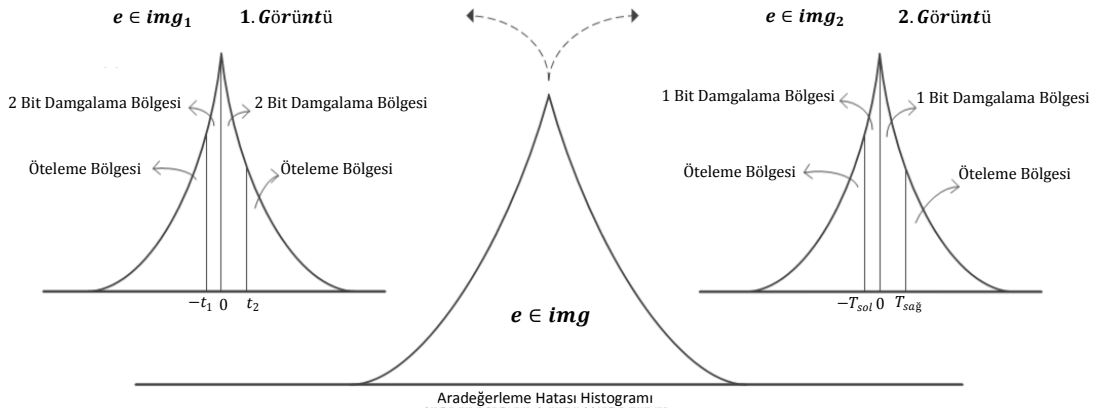
Örneğin $e = 4$ değerine damga biti olarak $b = 1$ ile damgalama yapıldığında görüntü üzerinde oluşan bozunum $D = 5$ olmaktadır. Hata değeri $e = 0$ için 2 bit ($b_1 = b_2 = 1$) damgalama gerçekleştirildiğinde ise $D = 3$ olmaktadır. Dolayısı ile $e = 4$ değerinin bir bit damgalanmasının damgalanmış görüntü üzerinde oluşturacağı bozunum, $e = 0$ değerinin iki bit damgalanması ile görüntü üzerinde oluşturacağı bozunumdan daha fazla olacaktır. Çalışmada uyarlanabilir damgalama stratejisi piksellere ait aradeğerleme hatalarının değerlerine göre, istenen kapasite doğrultusunda bir veya daha fazla bit damgalama gerçekleştirilerek uygulanmıştır.

Uyarlanabilir damgalama stratejisinde hangi piksellerin bir bit, hangi piksellerin birden fazla bit ile damgalanacağını belirlemek amacıyla piksellere ait standart sapma

(SS) değeri kullanılmıştır. SS, damgalama yapılacak piksele ait yerel karmaşıklık göstermektedir. Örneğin Şekil 4.1.'de yer alan P_{22} pikseline ait SS değeri

$$SS_{22} = 0.5\sqrt{\sum_{x=a,b,d,e}(P_x - u)^2} \quad (4.7)$$

olarak hesaplanır. Burada u kendini çevreleyen örneklenmiş piksellerin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. ($u = 0.25 \sum_{x \in (a,b,d,e)} P_x$) Yöntem ile uyarlanabilir damgalama işlemi yapmak için ilk olarak görüntü Δ_{tha} olarak belirlenen bir eşik değeri (Eşik değerinin nasıl belirlendiği ileriki bölümlerde anlatılacaktır.) ile img_1 (Birinci Görüntü) ve img_2 (İkinci Görüntü) olmak üzere iki bölgeye ayrılır. img_1 olarak ayrılan bölge $SS < \Delta_{tha}$ şartını sağlayan piksel değerlerinden, img_2 ise kalan piksel değerlerinden oluşmaktadır. img_1 olarak adlandırılan bölgede yer alan piksellere 2 bit damgalama yapılabilirken, img_2 bölgesinde kalan piksellere 1 bit damgalama yapılabilir. Damgalanmış görüntüden damga bitlerini ve orijinal görüntüyü elde ederken aynı SS değeri elde edildiğinden hangi piksellerin 1 bit hangilerinin 2 bit ile damgalandığı kod çözücü tarafından ayırt edilebilmektedir.



Şekil 4.3 Aradeğerleme hatası değerlerine ait görüntü piksellerinin sınıflandırılması

$M \times N$ boyutunda örnek bir görüntüde uyarlanabilir damgalama işlemi gerçekleştirmek için ilk olarak görüntüye ait pikseller damgalama kapasitesi doğrultusunda uygun bir Δ_{tha} değeri seçilerek img_1 ve img_2 olarak adlandırılan sanal iki görüntüye ayrılır. Daha sonra bu iki sanal görüntüye ait aradeğerleme hataları histogramları hesaplanır. Şekil 4.3. img_1 ve img_2 ye ait aradeğerleme hatalarının

histogramları gösterilmektedir. img_2 olarak adlandırılan bölgeye T_{sol} ve $T_{sağ}$ kapasite parametreleri doğrultusunda 1 bit ile damgalama işleminin nasıl gerçekleştiği Denklem (4.5)'te gösterilmiştir. img_1 bölgesine ait 2 bit damgalama işlemi ise eklenecek damga $b = 2b_1 + b_2$ olmak üzere, kapasite parametresi k ile belirlenen T_{sol} ve $T_{sağ}$ parametrelerinden $t_1 = \left\lfloor \frac{T_{sol}}{3} \right\rfloor$, $t_2 = \left\lfloor \frac{T_{sağ}}{3} \right\rfloor$ hesaplanmasıyla aşağıdaki formülle elde edilir.

$$x^w(i, j) = \begin{cases} x(i, j) + 3e + b, & t_1 \leq e < t_2 \\ x(i, j) + 3t_2, & 3t_2 \leq e \\ x(i, j) - 3t_1, & e < -3t_1 \end{cases} \quad (4.8)$$

4.5. Piksel Seçim İşlemi

Damga çözümü sırasında eklenen damga verisi ile birlikte orijinal görüntünün de tersinir bir şekilde geri elde edildiği TGD yöntemlerinde asıl amacın damgalama performansını arttırarak damgalanmış görüntüdeki bozunumu en aza indirmek olduğunu geçmiş bölümlerde tartışmıştık. Geleneksel TGD yöntemlerinde, damgalı görüntüde oluşan bozunumu etkileyen faktörlerden biri de, damgalanacak piksellere yer açmak için kullanılan ötelenen piksel sayısıdır. Damgalama işlemi sırasında kapasite parametresi $T_{sol} = T_{sağ} = T$ olan özel bir durum düşündüğümüzde piksellerin damgalama ve öteleme için ortalama bozunumları sırayla $0.5T^2$ ve T^2 olmaktadır. Bu varsayılan senaryo için görüntüye ait ortalama bozunum da aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$AD_{tum} = 0.5T^2P_c + T^2P_s \quad (4.9)$$

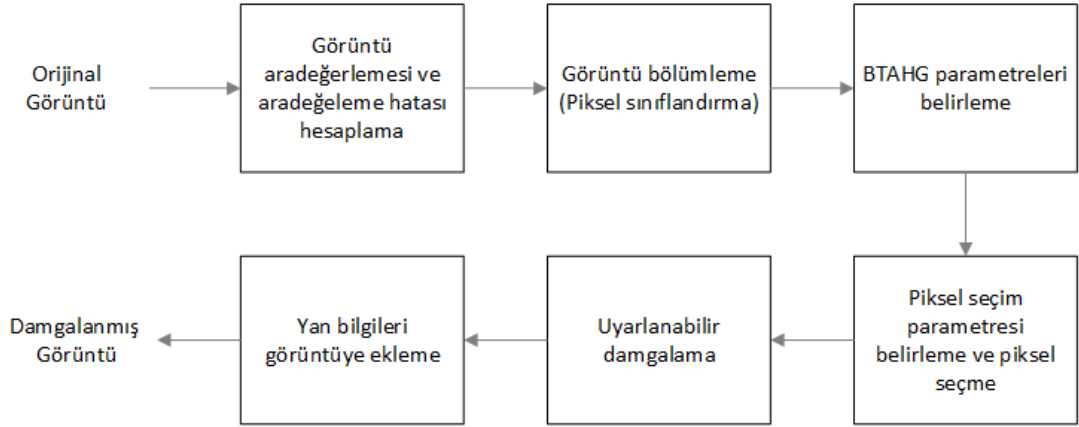
Bu formülde P_c damgalanmış piksel sayısını, P_s ise yeri değiştirilip ötelenen piksel sayılarını ifade etmektedir. Denklem (4.9)'e göre görüntüdeki bozunumun damgalama kapasitesi P_c , ötelenen piksel sayısı P_s ve kapasite parametresi T ye bağlı olduğu söylenebilir. Ayrıca bozunum damgalama bitinin $b = 1$ veya $b = 0$ olması durumuna göre de değişmektedir. T parametresi kapasiteye göre belirlenirken P_c ve b sabittir. Sabit olan bu parametreler değiştirilemeyeceğinden P_s yani ötelenmiş piksel

sayılarında herhangi bir azalma gerçekleştirilmesi görsel kalite de iyileştirme sağlayacaktır. Bu amaçla çalışmada uyarlanabilir damgalama yaklaşımı ile beraber damgalanmamış görüntüdeki bazı düzgün dağılımlı piksel değerlerinin damgalanmış görüntüde değiştirilmeden bırakıldığı piksel seçme işlemi kullanılmıştır.

Önerilen yöntem ile damgalama işleminde tüm parametreler belirlendikten sonra hangi ötelenecek piksellerin değiştirilmeden bırakılacağına karar verilmesi amacıyla Δ_{ths} ile ifade edilen bir eşik değeri kullanılmıştır. Standart sapma değeri (SS) eşik değerinden Δ_{ths} küçük olan pikseller öteleme ve damgalama işlemine tabi tutulurken, kalan pikseller değişmeden kalır. Δ_{ths} , kapasite doğrultusunda damgalama işleminin gerçekleşmesi için yeterli sayıda damgalanabilen ve ötelenen piksellerin seçilmesini sağlayan en küçük tamsayı değeridir.

4.6. Önerilen Yöntem

Bölgesel tabanlı aradeğerleme hatası genişletme (BTAHG) ismi ile önerilen yöntem; piksel sınıflandırma, uyarlanabilir damgalama ve piksel seçme tekniklerini kullanan hibrit bir algorithmadan oluşmaktadır. Yönteme ait blok diyagram Şekil 4.4.'te gösterilmiştir. Yöntem ile ilk olarak orijinal görüntüden aradeğerlenmiş yeni piksel değerleri elde edilir. Daha sonra görüntü, piksel sınıflandırma tekniği kullanılarak iki bölgeye ayrılır. Damgalanacak kapasite miktarına göre BTAHG yöntemine ait kapasite parametreleri ve piksel seçme tekniğine ait uygun eşik değeri ayarlanır. Tüm bu işlemlerden sonra damga verisi, uyarlanabilir damgalama yaklaşımı ile aradeğerleme hatalarına damgalanarak görüntüye eklenir. Son olarak da damga verisinin ve görüntünün tekrar tersinir bir şekilde elde edilmesini sağlamak amacıyla gerekli yan bilgiler görüntüye eklenir ve damgalanmış görüntü oluşturulmuş olur.



Şekil 4.4. Önerilen yönteme ait damgalama işlemi

4.6.1. Damgalama algoritması

Önerilen damgalama algoritması aradeğerleme işleminin yapılması ve veri damgalanması olarak adlandırılan iki bölümden oluşmaktadır. İlk olarak önceki bölümlerde bahsedildiği gibi örneklenmemiş piksellerin aradeğerlemeleri hesaplanarak bu piksellere ait aradeğerleme hataları elde edilir. Daha sonra aradeğerleme hataları hesaplanan örneklenmemiş piksellere için piksel sınıflandırma işlemi ile img_1 ve img_2 bölgeleri oluşturulur ve bu bölgeler uyarlanabilir damgalama yaklaşımı ile damgalanır. Eğer damgalama için örneklenmemiş pikseller yeterli olmadıysa; örneklenmiş piksellere için aradeğer hesabı, damgalı örneklenmemiş pikseller kullanılarak yapılır ve bu piksellere ait aradeğerleme hatası değerleri yine bölgelere ayrılarak bu hata değerleri uyarlanabilir damgalama yaklaşımı ile damgalanır.

$M \times N$ boyutunda gri seviye bir görüntü $I = \{(i, j): 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$ $((i, j)$ ye ait gri seviye değeri $x(i, j)$) olarak ifade edilsin, I ya ait damga eklenecek görüntü bölgesi $J = \{(i, j): 1 \leq i \leq M - 1, 1 \leq j \leq N - 1\}$, damgalanmış veri W ve J damga eklenecek görüntü bölgesi için örneklenmemiş piksel J_{ns} , örneklenmiş piksel J_s , aradeğerlemesi yapılmış örneklenmemiş piksel \hat{J}_{ns} ve aradeğerlemesi hesaplanan örneklenmiş piksel \hat{J}_s olsun. Damgalama işlemi soldan sağa ve yukarıdan aşağı doğru, başlangıç parametreleri ise $k = 0$, $\Delta_{ths} = 1$ ve $\Delta_{tha} = 0$ olmak üzere; algoritma aşağıdaki adımlardan oluşur.

1. İlk olarak YBB (Yan bilgi bölgesi) olarak adlandırılan ve Şekil 4.6.'da gösterilen alanda yer alan yan bilgi bit dizisi kadar (YBBB) piksel değerlerine ait en düşük anlamlı bitler (LSB) bir string dizisi haline getirilir. (YBBB'nin boyutu ve nasıl oluşturulduğu Bölüm 4.6.2'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.) $LSB_{YBB} = I[1: M, N] \oplus J[M, 1: N - 1]$ Burada \oplus string birleştirme (concatenation) fonksiyonunu ifade etmektedir. Daha sonra bu LSB_{YBB} dizisi damga dizisi W 'ye eklenerek yeni damga dizisi oluşturulur. $|W_t| = |LSB_{YBB}| \oplus |W|$.
2. Denklem 4.4 kullanılarak örneklenmemiş piksellerin aradeğerleri (\hat{J}_{ns}) elde edilir ve bu piksellere ait aradeğer hataları hesaplanır ($e(i, j) = J_{ns} - \hat{J}_{ns}$).
3. Her bir J_{ns} pikseline ait standart sapma SS_{ns} değerleri hesaplanır. $SS_{ns}(i, j) < \Delta_{tha}$ eşitliğini sağlayan piksel değerleri img_{ns1} , kalan piksel değerleri de img_{ns2} olarak adlandırılan görüntü bölgeleri oluşturulur.
4. Kapasite parametresi k değerine göre Denklem 4.6'dan bölgesel kapasite parametreleri T_{sol} , $T_{sağ}$ hesaplanarak $t_1 = \left\lfloor \frac{T_{sol}}{3} \right\rfloor$ ve $t_2 = \left\lfloor \frac{T_{sağ}}{3} \right\rfloor$ elde edilir.
5. Damga çözümü sırasında örneklenmiş piksellerin de damgalanıp damgalanmadığının tespiti için *bayrak* adlı bir değişken kullanılır. Bu değişken 0 olduğunda sadece örneklenmemiş pikseller damgalanırken, bu değişkenin 1 değerinde ise örneklenmiş pikseller de damgalamaya dahil edilmiştir. Damgalamanın ilk aşamasında *bayrak* = 0 olarak ayarlanır. T_{sol} ve $T_{sağ}$ parametrelerine göre $img_{ns2}(i, j)$ 'ye 1 bit, t_1 ve t_2 parametrelerine göre de $img_{ns1}(i, j)$ 'ye 2 bit damgalanır. Damga bitleri W_t dizisinden damgalamanın kaç bit olacağına göre alınır ve sonraki dizi elamanına geçilir. Bu damgalama işleminin sonucunda oluşan damgalı piksel değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.
 - Eğer $x(i, j) \in \{J_{ns} \cap img_{ns1}\}$ ise, damgalanmış piksel değeri $x^w(i, j)$ genelleştirilmiş veri damgalama formülü olan Denklem 4.5' ile bir bit damgalama yapılarak oluşturulur.
 - Eğer $x(i, j) \in \{J_{ns} \cap img_{ns2}\}$ ise, damgalanmış piksel değeri $x^w(i, j)$ Denklem 4.8'den elde edilir. Bu durumda damga dizisi W_t 'den 2 bit alınır damga biti ise $b = 2b_1 + b_2$ olmaktadır.

- Tüm bunların dışında $x(i, j) \in J_{ns}$ ise $x^w(i, j) = x(i, j)$ olur.
6. Eğer damga dizisi W_t 'ye ait tüm bitler damgalandıysa 8. adım işletilir.
- Eğer $bayrak = 1$ ise damgalama bitmediyse 7. adım işletilir.
 - Eğer $bayrak = 0$ ise ve W_t dizisi tamamen damgalanmadıysa damgalama için örneklenmiş pikselleri kullanmak üzere $bayrak$ değişkeni 1 yapılır ($bayrak = 1$). Damgalanmış örneklenmemiş piksellerden (J_{ns}^w) örneklenmiş piksellerin (J_s) aradeğerleri (\hat{J}_s) hesaplanarak her bir örneklenmiş pikselin aradeğer hatası bulunur ($e(i, j) = J_s - \hat{J}_s$). Bu noktada örneklenmiş piksellerin de damgalanması amacıyla 3. adıma gidilir. 3, 4 ve 5. Adımlar örneklenmiş pikseller için işletilerek damgalanmış örneklenmiş piksel değerleri J_s^w hesaplanır.
7. W_t damga dizisine ait tüm bitler tamamen damgalanmadıysa, kapasite parametresinin ayarlanaması için aşağıdaki adımlar takip edilir.
- Eğer $k \leq 509$ ise kapasite parametresi k bir arttırılır ($k + +$) ve 4,5 ve 6. adımlar damgalama işlemine baştan başlamak üzere k 'nın yeni değerine göre tekrarlanır.
 - Eğer ($k \leq 509$) şartını sağlamıyor ise "Damgalanmak istenen veri bu görüntüye damgalanamamaktadır" şeklinde uyarı mesajı vererek damgalama işlemi sonlandırılır.
8. Bu adıma gelindiğinde damgalama işlemi, seçilen damgalama parametreleri ile başarıyla gerçekleştirilmiş olmaktadır. Damgalanmış görüntüde daha iyi bir görsel kalite elde etmek amacıyla hesaplanan damgalama parametreleri doğrultusunda piksel seçme işleminin de uygulanması için orjinal görüntüye yeniden damgalama işlemi gerçekleştirilir. Damga dizisi W_t 'yi piksel seçme ile yeniden damgalama, orijinal görüntüde damga eklenecek görüntü bölgesine (J), $bayrak$ değişkeninin değerine göre gerçekleştirilir. Eğer $bayrak = 0$ ise sadece örneklenmemiş piksellerin; eğer $bayrak = 1$ ise, önce örneklenmemiş ardından örneklenmiş piksellerin damgalama işlemi seçilen kapasite ve eşik değerleri doğrultusunda aşağıdaki adımlar ile gerçekleştirilir. Δ_{ths} başlangıçta 1 olarak ayarlanır. Kapasite doğrultusunda damgalama işleminin gerçekleşmesi için yeterli sayıda damgalanabilen ve ötelenen piksellerin

seçilmesini sağlayan en küçük tamsayı değerine ulaşılan kadar Δ_{ths} değeri itetatif olarak arttırılır.

- Eğer $x(i, j) \in \{J_{ns} \cap img_{ns1}\}$ ve $SS_{ns}(i, j) < \Delta_{ths}$ ise, damgalanmış piksel değeri $x^w(i, j)$ Denklem 4.5' ten elde edilir.
- Eğer $x(i, j) \in \{J_{ns} \cap img_{ns2}\}$ ve $SD_{ns}(i, j) < \Delta_{ths}$ ise, damgalanmış piksel değeri $x^w(i, j)$ Denklem 4.8 den elde edilir. Bu durumda damga dizisi W 'den 2 bit alınarak $b = 2b_1 + b_2$ olmaktadır.
- Tüm bunların dışında $x(i, j) \in J_{ns}$ ise $x^w(i, j) = x(i, j)$ olur.

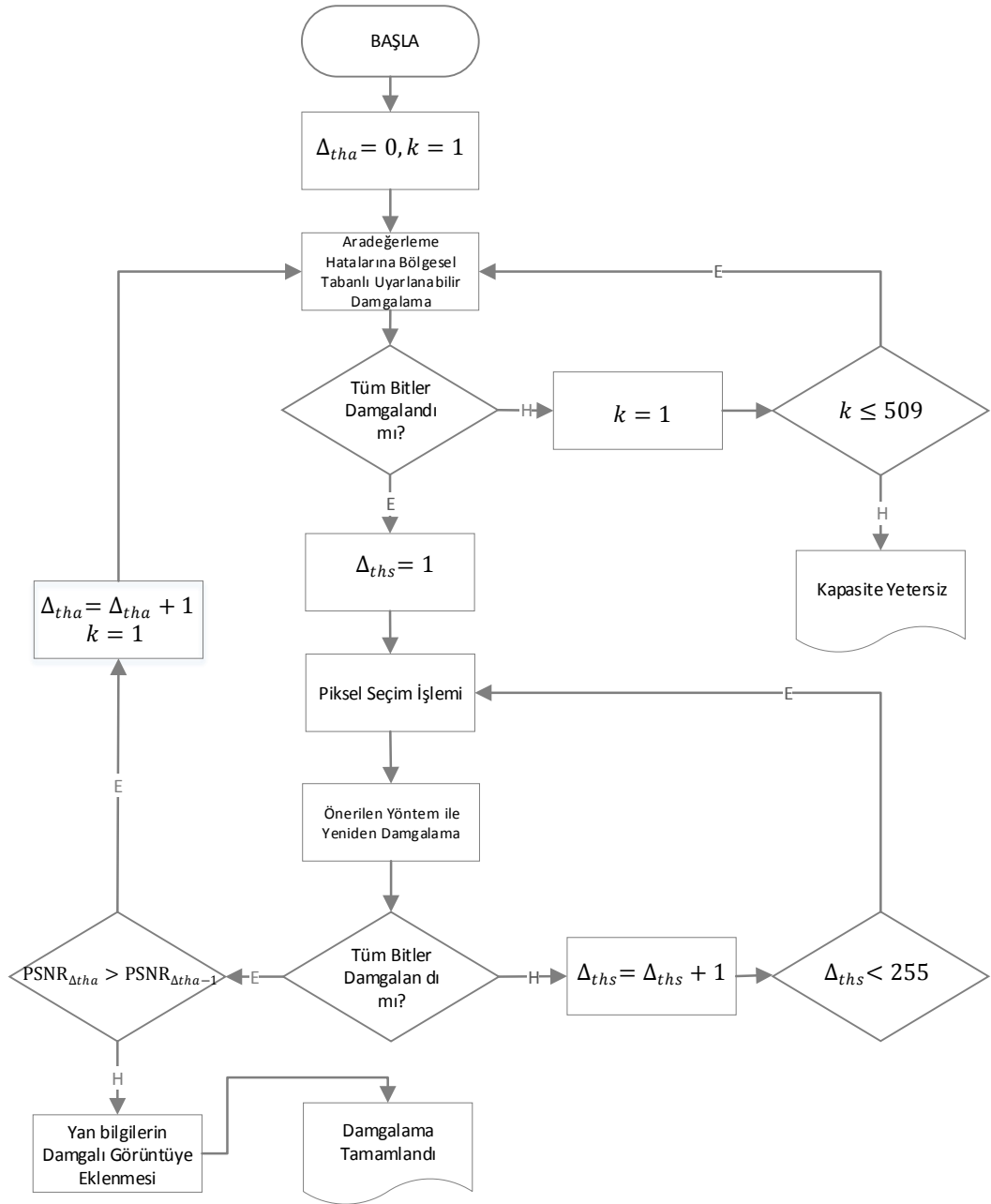
Eğer eklenecek bit dizisi W_t 'ye ait tüm bitler damgalanmadıysa, Δ_{ths} değeri 1 arttırılarak ($\Delta_{ths} = \Delta_{ths} + 1$) 8. adım tekrarlanır. Bu adım bittiğinde W_t damga dizisi görüntüye damgalanmış olacaktır.

9. Uygun Δ_{tha} değerinin belirlenmesi

- Δ_{tha} değeri bir arttırılarak $\Delta_{tha} = \Delta_{tha} + 1$, yukarıdaki tüm adımlar yeni değer için uygulanır.
- Δ_{tha} 'nın yeni değeri sonunda elde edilen damgalanmış görüntü kalitesi $\Delta_{tha} - 1$ için elde edilen damgalanmış görüntü kalitesinden daha iyi ise ($PSNR_{\Delta_{tha}} > PSNR_{\Delta_{tha}-1}$) 9. adım tekrarlanır. Aksi halde $\Delta_{tha} - 1$ e ait damgalama adımlarına ait damgalama parametreleri geçerli kılınarak damgalama işlemini sonlandırılır.

10. Şekil 4.7.'te gösterilen YBB bölgesindeki piksellere ait LSB'lere kapasite parametlerinin eklenmesi ile damgalı görüntü oluşturulur. $I^w = \{(i, j): 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$

Algoritmada Δ_{tha} parametresinin belirlenmesi genelde 2-8 iterasyon arasında gerçekleşmektedir. Aşağıda damgalama parametrelerinin belirlenmesine ait blok diyagram, damgalama adımlarıyla beraber Şekil 4.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Önerilen yöntem ile damgalama parametrelerinin belirlenmesine ait blok diagram

4.6.2. Yan bilgilerin elde edilmesi

Damga çözümü sırasında damgalanmış görüntüden orijinal görüntünün ve eklenen damga bitlerinin tekrar geri elde edilebilmesi için bazı bilgilerin damga çözücüye yan bilgi olarak iletilmesi gerekmektedir. Genelde bu tip yan bilgiler hangi piksellerin damgalanıp damgalanmadığı, taşma piksellerinin konumları ve damga ekleme algoritmasında kullanılan çeşitli parametrelerden oluşur. Önerilen yöntemde

damgalanmış piksellerin belirlenmesinde dört farklı parametre *bayrak*, k , Δ_{tha} and Δ_{ths} kullanılmıştır. Burada k parametresi veri damgalamada kullanılacak aday pikselleri, Δ_{tha} görüntünün iki farklı sanal görüntüye ayrılmasını sağlar. Bu sayede hangi bölgeye birden fazla bit damgalanacağı belirlenir. Δ_{ths} piksel seçme algoritmasında kullanılan bir eşik değeri parametresidir. *bayrak* ise örneklenmiş piksellerin damgalanıp damgalanmadığını belirlemek için kullanılır. Örneklenmiş pikseller damgalandığında bu değer 1, damgalanmadığında ise 0 olacaktır. Dolayısı ile bu parametre 1 bit ile temsil edilebilir. Gri seviye bir görüntüde k , Δ_{tha} ve Δ_{ths} ise $[0,255]$ aralığında değer alabileceğinden bu değişkenlerin her biri 8 bit ile temsil edilmiştir. Damgalama işleminin hangi piksel koordinatlarında bittiğine dair bilgi de damga çözümü için gereklidir. Damga bitiş koordinatı (*DBK*) olarak adlandırılan bu değer $[\log_2(MN)]$ ile 512×512 'lik bir görüntü için 9 bit ile ifade edilebilir. Ayrıca gri seviye bir görüntü için $[0,255]$ aralığında olması gereken piksel değerlerinin, damgalama işlemi sırasında bu aralığın dışına çıktığı durumlar oluşabilmektedir. Örneğin damgalama işleminde damgalama parametresi $k = 1$ olması durumunda $T_{sol} = 1$, $T_{sağ} = 2$ değerini alacak, $-255,254$ ve 255 hata değerine sahip pikseller damgalama işlemi için kullanıldığında ise gri seviye parlaklık sınırlarının dışına çıkarak sırayla $-256,256, 257$ değerini alacaklardır. Bu tip pikseller problemlilikli pikseller olarak adlandırılır ve bu piksel değerleri damgalama ve öteleme işlemine tabi tutulmaz. Örnekte de görülebileceği üzere problemlilikli piksellerin sayısı damgalama parametresi k 'ya ve görüntü piksel değerlerine bağlıdır. Çalışmada sorunlu pikselleri belirlemek için bu piksellerin konumları yan bilgi olarak saklanmıştır. Orijinal görüntüde damgalama işlemi yapıldığında taşma meydana gelen pikseller görüntünün bölgelerine göre aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

- img_1 için sol bölge: $[0, T_{sol})$,
- img_1 için sağ bölge: $[256 - T_{sağ}, 255]$
- img_2 için sol bölge: $[0, T_{sol}]$,
- img_2 için sağ bölge: $(255 - T_{sağ}, 255]$

Orijinal görüntüde piksel değerleri, ait olduğu bölgeye göre k kapasite parametresi doğrultusunda yukarıda tanımlanan sınırlar içerisinde yer alıyorsa, bu pikseller damgalama işlemine katıldığında piksel değerlerinde taşma meydana gelecektir. Şekil

4.6.'da 5×5 'lik örnek bir hata görüntüsünde $k = 1$ değeri için problemlili piksellere ait örnek bir gösterim gerçekleştirilmiştir.

255	250	254	255	252
200	215	218	254	222
-255	-250	-254	-210	-255
-199	-185	-195	-200	-200
-255	-185	-200	-195	-200

(a)

1	0	1	1	0
0	0	0	1	0
1	0	0	0	1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0

(b)

Şekil 4.6. a) 5×5 'lik görüntü kesiti (b) $k=1$ değeri için görüntü kesitine ait problemlili piksellerin örnek gösterimi, 1 değerli koordinata sahip pikseller problemlili pikseller olarak adlandırılır

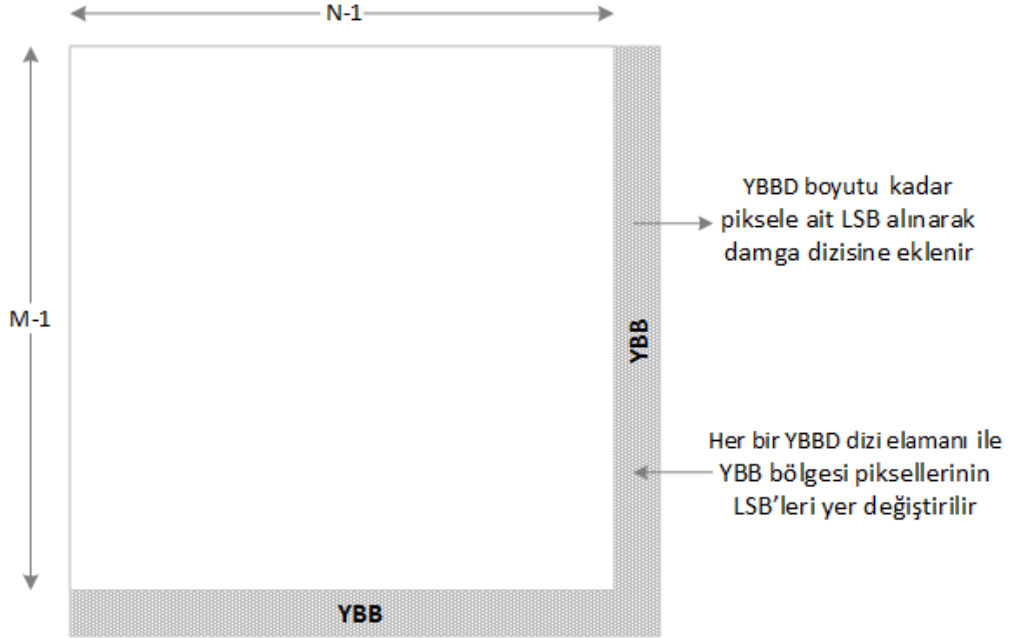
Problemlili piksellerin sayısı C_{pp} olarak kabul edilirse bu piksellerin herbirine ait x ve y eksenindeki koordinat değerleri $\lceil \log_2(MN) \rceil$ olarak hesaplanabilir. Bu durumda tüm problemlili piksellerin yan bilgi olarak saklanması için $\lceil \log_2(MN) \rceil \times |C_{pp}|$ bit bilgiye ihtiyaç vardır. Ayrıca taşma meydana gelen piksel sayısı C_{pp} 'nin de L 'nin uzunluğunun tespit edilmesi adına damga çözümü sırasında bilinmesi gereklidir. Damgalama işleminde kullanılan tüm yan bilgi bileşenleri Şekil 4.7.'da gösterilmiştir.

k	bayrak	Δ_{tha}	Δ_{ths}	DKK	C_{pp}	L
8 Bit	1 bit	8 bit	8 bit	$\lceil \log_2(MN) \rceil$ bit	Kapasite parametresine ve görüntüye göre değişmektedir	$\lceil \log_2(MN) \rceil \times C_{pp} $ bit

Şekil 4.7. Yan bilgileri temsil etmek için gerekli bit miktarları

Tüm yan bilgi parametrelerinin belirlenmesinin ardından yan bilgiler $YBBD$ olarak adlandırılan birbirinin ardına eklenerek oluşturulan tek bir bit dizisi haline getirilir. $YBBD = k \oplus \text{bayrak} \oplus \Delta_{tha} \oplus \Delta_{ths} \oplus DKK \oplus C_{pp} \oplus L$

Damgalama işlemi, *YBBD* dizisine ait elamanların damgalama yapılan görüntünün *YBB* olarak adlandırılan bölgesinde yer alan piksellerin en düşük anlamlı bitleri (LSB) ile yer değiştirilmesi ile sona erer. Şekil 4.8.'de *YBB* bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 4.8. $M \times N$ 'lik bir görüntüde yan bilgilerin saklandığı bölge

4.6.3. Damga ve orijinal görüntünün geri elde edilmesi

Görüntüye eklenen damganın ve orijinal görüntünün damgalı görüntüden elde edilebilmesi için damga ekleme sırasında belirlenen yan bilgi parametrelerinin elde edilmesi gerekmektedir. Damga çıkarma işlemi *YBB* bölgesindeki piksellere ait LSB'lerin alınarak damga parametrelerinin elde edilmesi ile başlar. Damga çözücü tarafından damgalı görüntüden gizlenen verinin elde edilmesi süreci aşağıdaki adamlardan oluşur.

1. Damgalanmış görüntü $I^w = \{(i, j): 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$ olarak ifade edildiğinde, damgalanmış görüntü üzerinde *YBB* bölgesinde yer alan piksellerin en düşük anlamlı bitleri (LSB) çıkarılarak k , $bayrak$, Δ_{tha} , Δ_{ths} , DKK , C_{pp} ve L parametreleri elde edilir.
2. Damgalı görüntüde damgalanmış alan

$J^w = \{(i, j): 1 \leq i \leq M - 1, 1 \leq j \leq N - 1\}$ şeklindedir.

- Damgalama işlemi sırasında sadece örneklenmemiş pikseller damgalandıysa ($bayrak = 0$) sadece örneklenmemiş piksellerin aradeğerleme hataları hesaplanarak 3-4-5. adımlar bu pikseller için uygulanır.
 - Eğer damgalama işlemine örneklenmiş pikseller de katıldıysa ($bayrak = 1$) ilk olarak örneklenmiş piksellerin aradeğeri hesaplanarak bu piksellere ait damga çıkarımı 3-4-5. adımlar uygulanarak hesaplanır. Bu noktada orijinal örneklenmiş piksel değerleri elde edilmiş olur. Daha sonra örneklenmemiş piksellerin aradeğeri hesaplanarak, 3-4-5. adımlar örneklenmemiş piksellerden damga çıkarımı için uygulanır.
3. $SD(i, j) < \Delta_{tha}$ şartına uygun olarak img_1 ve img_2 bölgeleri oluşturulur.
 4. Başlangıçta elde edilen k kapasite parametresi değerine göre T_{sol} , $T_{sağ}$, t_1 ve t_2 parametreleri hesaplanır.
 5. Damgalanmış piksel koordinatı L dizisi içerisinde problemlili piksel olarak yer alıyorsa, bu piksele herhangi bir işlem yapılmadan bir sonraki piksel değerine geçilir. Piksel problemlili piksel değilse ve piksele ait standart sapma değeri $SS(i, j) < \Delta_{ths}$ şartını sağlıyorsa bu piksel damgalama işlemine dahil edilmiştir. Damga çıkarımı aşağıdaki şartlar çerçevesinde gerçekleşecektir.
 - Eğer damgalanmış piksel img_2 sanal görüntüsü içerisindeyse damga biti Denklem 4.10 ile

$$b = \lfloor e^w(i, j) \rfloor - 2 \left\lfloor \frac{e^w(i, j)}{2} \right\rfloor, \quad 2T_{sağ} > e^w(i, j) \geq -2T_{sol} \quad (4.10)$$

elde edilir. Orijinal piksel değeri ise

$$x(i, j) = \begin{cases} x^w(i, j) - \left\lfloor \frac{e^w(i, j)}{2} \right\rfloor - b, & 2T_{sağ} > e^w(i, j) \geq -2T_{sol} \\ x^w(i, j) - T_{sağ}, & e^w(i, j) \geq 2T_{sağ} \\ x^w(i, j) + T_{sol}, & e^w(i, j) < -2T_{sol} \end{cases} \quad (4.11)$$

eşitliğinden hesaplanır.

- Eğer damgalanmış piksel img_1 sanal görüntüsü içerisindeyse damga biti Denklem 4.12 ile

$$b = |e^w(i, j)| - 4 \left\lfloor \frac{e^w(i, j)}{4} \right\rfloor, \quad 4T_{sağ} > e^w(i, j) \geq -4T_{sol} \quad (4.12)$$

Orijinal piksel değeri ise

$$x(i, j) = \begin{cases} x^w(i, j) - 3 \left\lfloor \frac{e^w(i, j)}{4} \right\rfloor - b, & 4T_{sağ} > e^w(i, j) \geq -4T_{sol} \\ x^w(i, j) - 3t_2, & e^w(i, j) \geq 4t_2 \\ x^w(i, j) + 3t_1, & e^w(i, j) < -4t_1 \end{cases} \quad (4.13)$$

denklemleri ile hesaplanır.

Yukarıdaki adımlar tüm piksel değerleri için uygulandığında damga bitleri ve orijinal görüntü (YBB bölgesi hariç) tersinir bir şekilde elde edilmiş olur. Elde edilen damga dizisi ($|W_t| = |LSB_{YBB}| \oplus |W|$) YBB bölgesindeki piksellerin LSB 'lerini de içermektedir. LSB_{YBB} bitleri $|W_t|$ dizisinden çıkarıldığında orijinal damga bitleri elde edilmiş olur. Çıkarılan LSB_{YBB} dizisine ait bit elamanları da YBB bölgesindeki piksellerin LSB 'leri ile yer değiştirildiğinde orijinal görüntü de kayıpsız olarak elde edilir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Önerilen görüntü damgalama algoritması histogram dağılımları farklı, literatürde karşılaştırma amacıyla sıklıkla kullanılan, 512×512 boyutunda, 8 bitlik gri seviye standart test görüntüleri olan “lena”, “baboon” ve “plane” (Şekil 5.1.) kullanılarak incelenmiştir.

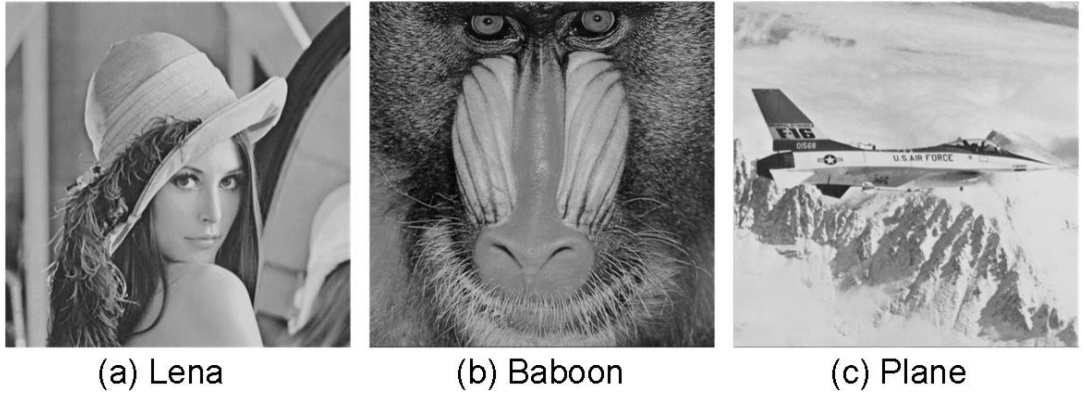
Geçekleştirilen bilgisayar benzetimlerinde, rasgele oluşturulmuş bit dizisi damga bitleri olarak kullanılmıştır. Kapasite açısından benzer yöntemleri karşılaştırmak amacıyla, görüntüdeki piksel başına damgalanan bit (BPP) miktarı ve tepe işaret-gürültü-oranı ($PSNR$) kullanılmıştır. W_c görüntüye eklenen toplam bit sayısını, M ile N görüntünün piksel cinsinden en ve boy uzunluğunu göstermek üzere BPP

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

eşitliği ile hesaplanır. (i, j) indeklerine ait orjinal görüntüdeki parlaklık seviyesi $G(i, j)$, aynı indeks değerleri için damgalı görüntüdeki parlaklık seviyesi $G^w(i, j)$ olmak üzere görsel görüntü kalitesi desibel cinsinden

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

denklemleri ile hesaplanır.



Şekil 5.1. Damgalama için kullanılan örnek test görüntüleri

Önerilen yöntem diğer yöntemlerle iki açıdan karşılaştırılmıştır. İlk olarak önerilen yöntemin uyarlanabilir damgalama ve piksel seçme teknikleri olmadan, yalın hali geleneksel ÖHG yöntemi ile karşılaştırılmış, uyarlanabilir damgalama ve piksel seçme tekniğinin algoritmaya katkısı gösterilmiştir. Daha sonra BTAHG yönteminin standart test görüntülerinde kapasite/görüntü kalitesi performansı diğer yöntemlerle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca yöntem yüz eli adet test görüntüsüne uygulanmış, her bir görüntünün aynı damgalama kapasitelerinde oluşan görüntü kalitesi performans ortalamaları da gösterilmiştir.

Geleneksel ÖHG ve BTAHG'nin yalın halinin belirli kapasite değerlerine göre görüntü kalitesindeki kazanımları lena ve plane görüntüsü için Tablo 5.1. ve Tablo 5.2.' de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Örneğin plane görüntüsünde 0.325 bpp'lik damgalama seviyesinde damgalı görüntüdeki görsel kazanç 0.8 db'dir. lena görüntüsünde 0.25 BPP damgalama seviyesinde görsel kazanç ise 0.535 db'dir. Yine lena için aynı damgalama seviyesinde ÖHG 'de ötelenecek piksellerin tümü 2 bit ötelenirken, BTAHG'nin yalın halinde kapasite parametreleri doğrultusunda bazı pikseller 1 bit, bazıları ise 2 bit ötelenmektedir. Benzer durumlar diğer kapasite seviyeleri içinde geçerlidir. Düşük, orta ve yüksek tüm kapasite seviyelerinde BTAHG yalın hali, kapasite/görsel kalite performansı olarak geleneksel ÖHG yönteminden daha iyi sonuçlar vermektedir. Ancak yüksek damgalama seviyelerine doğru görsel kalite birbirine yaklaşmaktadır. Tablolardaki tüm sonuçlar ele alındığında BTAHG'de görüntüdeki toplam ötelenen piksel miktarının azaltılması ile damgalanmış görüntüde görüntü kalitesinin korunması sağlanmıştır.

Tablo 5.1. Lena görüntüsü için ÖHG yöntemi ile BTAHG'nin yalın halinin görsel kalite ve ötelenen piksel olarak karşılaştırılması

Damgalama Oranı (BPP)	ÖHG de T parametresi	Yalın BTAHG T_{sol} ve $T_{sağ}$ parametresi	PSNR db kazancı
0,25	2	{1,2}	0,535
0,425	3	{2,3}	0,381
0,575	4	{3,4}	0,215
0,675	5	{4,5}	0,199
0,745	6	{5,6}	0,168

Tablo 5.2. Plane görüntüsü için ÖHG yöntemi ile BTAHG'nin yalın halinin görsel kalite ve ötelenen piksel olarak karşılaştırılması

Damgalama Oranı (BPP)	ÖHG de T parametresi	Yalın BTAHG T_{sol} ve $T_{sağ}$ parametresi	PSNR db kazancı
0,325	2	{1,2}	0,8
0,525	3	{2,3}	0,575
0,675	4	{3,4}	0,430
0,75	5	{4,5}	0,395
0,85	8	{7,8}	0,258

Geleneksel ÖHG, yalın ve uyarlanabilir BTAHG yöntemlerinin damgalama performansları ise lena ve plane görüntüleri için Tablo 5.3. ve Tablo 5.4.'de gösterilmiştir. Düşük ve orta seviye damgalama oranlarında tüm yöntemler benzer olarak küçük kapasite parametrelerine sahipken, yüksek damgalama seviyelerine çıktığında uyarlanabilir BTAHG yönteminin damgalama parametreleri düşük değerler almakta ve bu sayede görsel kalite korunmaktadır.

Örneğin uyarlanabilir BTAHG, yalın BTAHG ve geleneksel ÖHG yöntemi ile lena görüntüsüne 1 BPP damgalama yapıp damgalanmış görüntüler karşılaştırıldığında, uyarlanabilir BTAHG; yalın BTAHG'ye göre 2.99, geleneksel ÖHG'ye göre 3.08 dB daha iyi görsel kaliteye sahiptir.

Tablo 5.3. Lena görüntüsü için geleneksel ÖHG, yalın BTAHG ve uyarlanabilir BTAHG'nın damgalama performansları

Damgalama Oranı (BPP)	ÖHG'de T parametresi	Yalın BTAHG için T_{sol} ve $T_{sağ}$ parametresi	Uyarlanabilir BTAHG için T_{sol} ve $T_{sağ}$	ÖHG'ye göre kazanç(db)	Yalın BTAHG'ya göre kazanç(db)
0,6	4	{3,4}	{3,4}	0,22	0
0,7	5	{4,5}	{4,5}	0,20	0
0,8	6	{6,6}	{6,6}	0,018	0
0,95	14	{14,14}	{9,9}	1,23	1,22
1	110	{110,110}	{9,9}	3,08	2,99

Tablo 5.4.Plane görüntüsü için geleneksel ÖHG, yalın BTAHG ve uyarlanabilir BTAHG'nın damgalama performansları

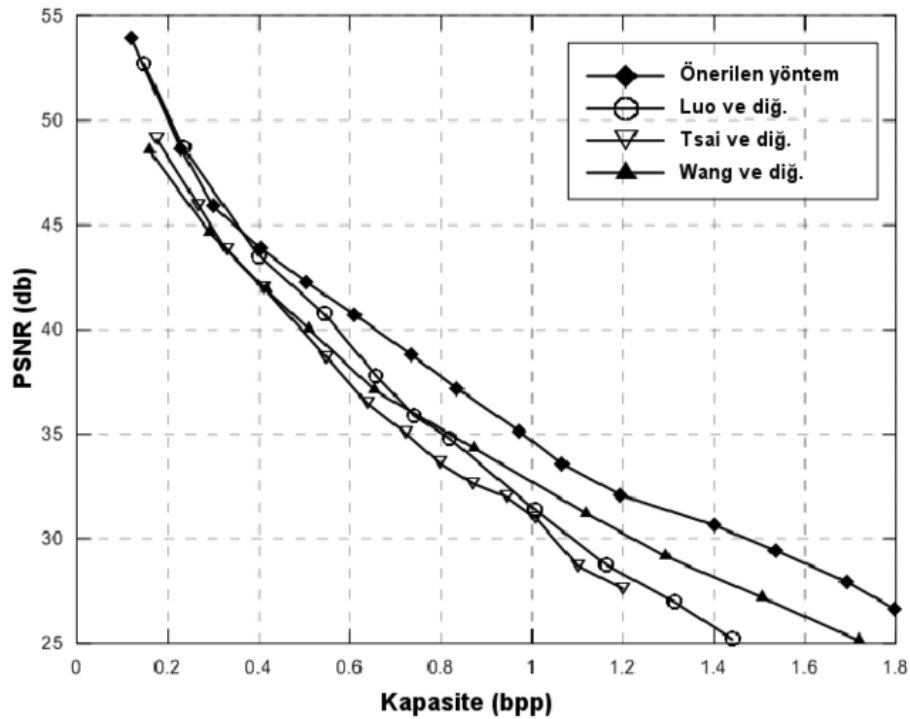
Damgalama Oranı (BPP)	ÖHG de T parametresi	Yalın BTAHG için T_{sol} ve $T_{sağ}$ parametresi	Uyarlanabilir BTAHG için T_{sol} ve $T_{sağ}$	ÖHG'ye göre kazanç(db)	Yalın BTAHG'ya göre kazanç(db)
0,6	3	{3,3}	{3,3}	0	0
0,7	4	{4,4}	{3,4}	0,19	0,19
0,8	6	{5,6}	{5,5}	0,58	0,23
0,95	17	{17,17}	{6,6}	4,19	4,01
1	121	{120,121}	{6,6}	6,7	6,3

Piksel seçme işleminin yalın BTAHG yöntemine katkısı lena görüntüsü için incelendiğinde ise ötelenen piksel sayılarındaki azalma ve görsel kalitedeki kazanç Tablo 5.5.'de gösterilmiştir. Örneğin lena görüntüsünde yaklaşık 0.16 bpp'lik damgalama seviyesinde (41780 damga biti) piksel seçme işlemi ile ötelenen piksel sayısı hemen hemen yarı yarıya azalarak 89747'den 46161'e düşmüştür. Yaklaşık 0.19 bpp'lik damgalama seviyesinde (49613 damga biti) ise piksel seçme işlemi ile ötelenen piksel sayısı 40096 adet azaltılmış buda damgalanmış görüntüde 1,545 db'lik bir kazanç sağlamıştır. Tablodan da anlaşılacağı gibi piksel seçme işlemi ile ötelenen piksel sayılarındaki azalma görsel kaliteyi arttırmıştır.

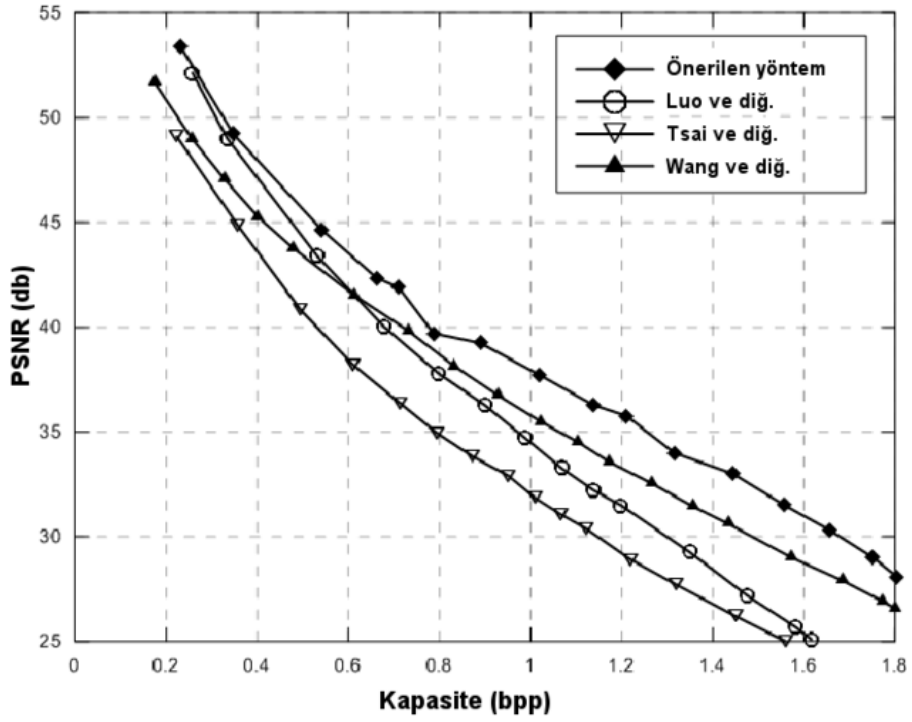
Tablo 5.5. Lena görüntüsü için piksel seçme işleminde ötelenen piksel sayıları ve görsel kalite kazancı

Kapasite	BTAHG de ötelenen piksel sayısı	Piksel seçme işlemlili BTAHG'de ötelenen piksel sayısı	PSNR db kazancı
10445	23823	18127	0,927
20890	42037	30761	1,041
31335	62831	37824	1,651
41780	89747	46161	2,158
49613	109138	69042	1,545

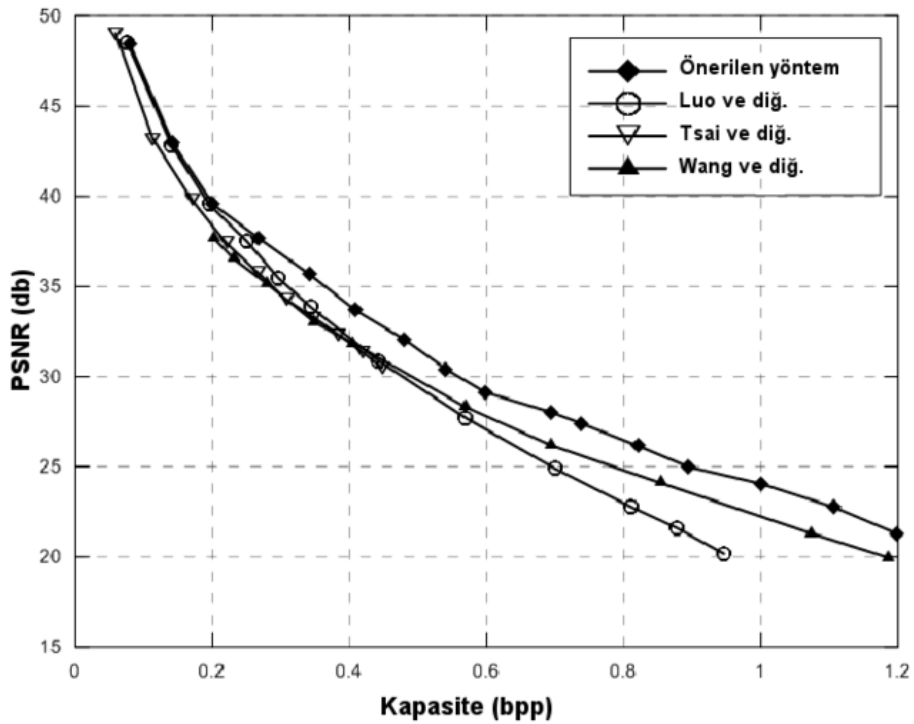
Yukarıdaki tüm karşılaştırmaların yanı sıra önerilen yöntem [33], [39] ve [57] üç benzer çalışmayla kapasite/görsel kalite (PSNR- tepe işaret gürültü oranı) ölçütleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Önerilen ve karşılaştırma yapılan yöntemlerde lena, plane ve baboon görüntülerine ait kapasite/görsel kalite performansları sırayla Şekil 5.2., Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.'te verilmiştir. Ayrıca 150 adet test görüntüsüne ait damgalama performansları incelenerek bu görüntülere ait ortalama kapasite/görüntü kalitesi değerleri de Şekil 5.5.'de gösterilmiştir.



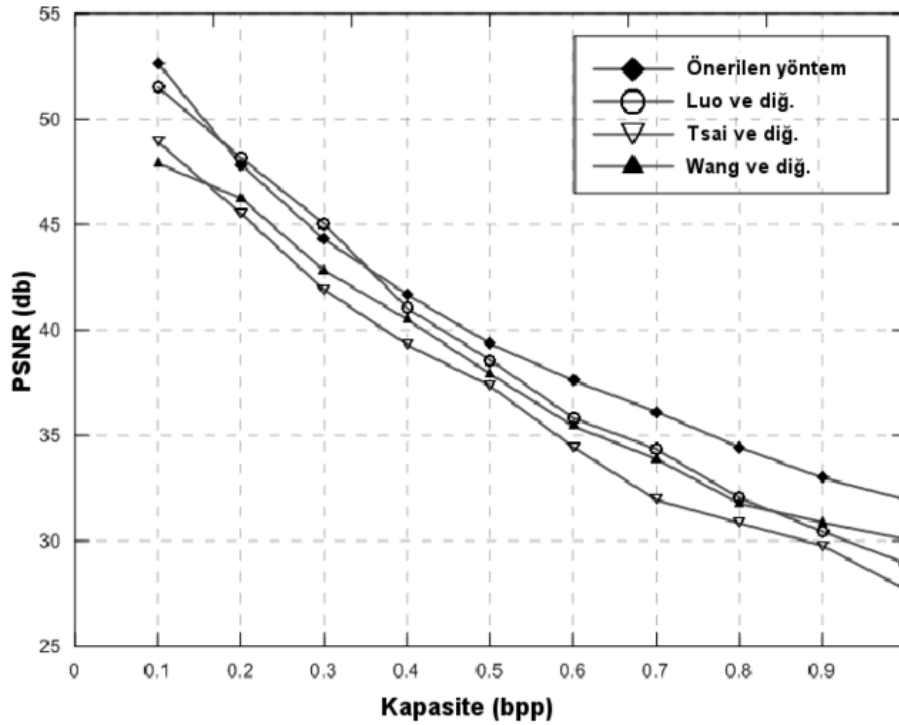
Şekil 5.2. Lena görüntüsü için önerilen yöntem ile diğer yöntemlerin kapasite bozunum performansı karşılaştırması



Şekil 5.3. Plane görüntüsü için önerilen yöntem ile diğer yöntemlerin kapasite bozunum performansı karşılaştırması



Şekil 5.4. Baboon görüntüsü için önerilen yöntem ile diğer yöntemlerin kapasite bozunum performansı karşılaştırması



Şekil 5.5. 150 adet test görüntüsü ile elde edilen sonuçların ortalamalarının önerilen yöntem ile diğer yöntemlerin kapasite bozunum performansı karşılaştırmaları

Gri seviyeli lena görüntüsü için önerilen yöntem; [39] yöntemi ile 0.4bpp damgalama seviyesine kadar benzer bir görsel kaliteye sahip iken bu noktadan sonra [39] yöntemi ile görsel kalitedeki fark git gide açılmaktadır. Önerilen yöntem Lena görüntüsündeki damgalama performansı [33] ve [57] yöntemleri ile karşılaştırıldığında ise tüm damgalama seviyelerinde yöntemin üstünlüğü gözükmemektedir. Histogram dağılımı nispeten lena görüntüsüne benzeyen ve plane görüntüsünde de sonuçlar lena görüntüsüne benzerdir. Plane görüntüsünde önerilen yöntemin 0.8 bpp damgalama seviyesinde [57] nolu yöntemden yaklaşık 1 dB, [39] yönteminden yaklaşık 2 dB ve [33] nolu yöntemden yaklaşık 5 dB daha iyi sonuç verdiği Şekil 5.3.'ten görülmektedir. Histogram dağılımı düzgün olmayan baboon görüntüsünde ise tüm yöntemler 0.2 bpp damgalama seviyesine kadar benzer damgalama performansı gösterirken, bu seviyeden sonra diğer tüm kapasite değerlerinde yöntemin üstünlüğü Şekil 5.4.'den gözükmemektedir.

150 adet test görüntüsünde belirli kapasiteler için ortalama PSNR değerleri incelendiğinde önerilen yönteme ait damgalanmış görüntü performansı 0.4 bpp'e kadar [39] yöntemi ile benzer iken, [33] ve [57] yöntemlerinden daha iyi olduğu

Şekil 5.5.'ten anlaşılmaktadır. 0.4 bbp damgalama seviyesinden sonra ise yöntemin görsel kalite olarak diğer yöntemlerden üstünlüğü gözükmemektedir. Önerilen yöntemde uyarlanabilir damgalama stratejisi ve piksel seçme algoritması kullanılarak damgalama kapasitesi artarken görsel kapasite korunmaktadır.

Bu çalışmada, komşu pikseller arasındaki ilintiden aradeğerleme tekniği ile etkin bir şekilde yararlanıldığı bölgesel tabanlı yeni bir tersinir damgalama algoritması önerilmiştir. Önerilen damgalama algoritması ile görüntü sanal olarak iki bölgeye ayrılmış, bu bölgelere istenen kapasite doğrultusunda daha kontrollü bir şekilde veri damgalama işleminin yapılması sağlanmıştır. Yöntemde kullanılan uyarlanabilir damgalama stratejisi ile aradeğerleme hatası düşük piksellere birden fazla bit damgalanarak daha yüksek kapasite değerlerine çıkmıştır. Önerilen yöntemde kullanılan piksel seçme algoritması ile de ötelenen piksel sayısı azaltılmış böylece damgalanmış görüntünün görsel kalitesinde iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca düşük kapasitelerde damga bitlerinin düzgün olarak dağıtımı ve damga çözümü sırasında gerekli yan bilgilerin görüntü üzerinde elde edilmesi gibi problemler için özgün çözümler önerilmiştir. Çalışmanın bulguları kapasite ve görsel kalite açısından diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen yöntemin daha iyi sonuçlar verdiği bilgisayar benzetimleri ile gösterilmiştir.

Yöntemler için damgalı ve orijinal görüntülerin karşılaştırılmasında literatürde yaygın olarak kullanılan PSNR ölçütü kullanılmış ve tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca görüntü üzerinde bölgesel tabanlı olarak oluşturulan temel algoritmaya uyarlanabilir damgalama stratejisi ve piksel seçme işlemlerinin katkısı incelenerek damgalanmış görüntü kalitesinde oluşan kazançlar gösterilmiştir.

Önerilen yöntem çeşitli yaklaşımlarla iyileştirilebilir. Örneğin görüntü tahmininde kullanılan aradeğerleme yöntemi yerine daha iyi sonuç veren bir tahmin yöntemi geliştirilebilir. Böylece görüntüye ait piksel hatalarının vasyansının düşük değer almasıyla histogramın maksimum noktalarına ait frekans değerleri yüksek olacaktır. Bunun sonucunda da daha iyi bir damgalama performansı elde edilecektir. Ayrıca yöntemde kullanılan damgalama parametrelerinin daha düşük işlem karmaşıklığı ile

elde edilebilmesi için uygun bir optimizasyon analizi gerçekleştirilebilir. Bu sayede yönteme ait algoritmik karmaşıklık azalacaktır. Son olarak da günümüzde internet ortamında iletilen verinin servis sağlayıcılar tarafından bilinmesinin istenmeyip, sadece alıcı tarafında bilinmesinin istendiği bazı durumlar ortaya çıkmıştır. Bu da görüntü için düşünüldüğünde görüntünün şifrelenmesi gerekecektir. Son yıllarda şifreli görüntü damgalama üzerine çalışmalar mevcut olup bu tezde yapılan çalışmalar göz önüne alınarak, yapılan çalışmanın şifreli görüntüler üzerinde gerçekleştirilmesine yönelik araştırmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Herodotos, İş Bankası yayınları, 2016.
- [2] Cox, I., Miller, M., Bloom, J., Kalker, T., Digital watermarking and steganography, Morgan Koufman, 2007.
- [3] Raggio M.T., Hosmer, C., Data hiding, Elsevier 2013.
- [4] Langelaar, G.C., Setyawan, I., Lagendijk, R.L., Watermarking digital image and video data a state-of-the-art overview, IEEE Signal Processing Magazine, 17(5), 20-46, DOI: 10.1109/79.879337, 2000.
- [5] Podilchuk, C.I., Delp, E.J., Digital watermarking: algorithms and applications, IEEE Signal Processing Magazine, 18(4), 33-46, DOI: 10.1109/79.939835, 2001.
- [6] Cox I.J., M. L. Miller, J. A. Bloom, Digital Watermarking and fundamentals, Morgan Kaufmann, San Francisco, 2002.
- [7] Moulin, P., Koetter, R., Data-hiding codes, Proceedings of the IEEE, 93(12), 2083-2126, DOI: 10.1109/JPROC.2005.859599, 2005.
- [8] Tao, H., Chongmin, L. Zain., Abdalla A., Robust Image Watermarking Theories and Techniques: A Review, Journal of Applied Research and Technology. 12. 122-138. 10.1016/S1665-6423(14)71612-8, 2014
- [9] Caldelli, R., F. Filippini, R. Becarelli, Reversible watermarking techniques: an overview and a classification, EURASIP Journal on Information Security. 2010.
- [10] Ni, Z., Shi Y.Q., Ansari N., Su, W., Reversible data hiding. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol. 16, no. 3, pp. 354–362, Mar. 2006.
- [11] Feng, J.B., Lin, I.C., Tsai, C.S., Chu Y.P., Reversible watermarking: Current status and key issues, International Journal of Network Security, 2(3), 161-171, 2006.

- [12] Yüzkollar, C., Kocabiçak, Ü., Region based interpolation error expansion algorithm for reversible image watermarking, *Applied Soft Computing*, Volume 33, Pages 127-135, ISSN 1568-4946,2015.
- [13] Shi Y.Q., Li, X., Zhang, Wu, H. T., and Ma, B., Reversible data hiding: Advances in the past two decades, in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3210-3237, 2016.
- [14] Tian, J., Reversible data embedding using a difference expansion, *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 13, (8), pp. 890–896,2003.
- [15] Vural, C., Baraklı, B., Reversible video watermarking using motion-compensated frame interpolation error expansion, *Signal, Image and Video Processing*, 9(7), 1613-1623, DOI: 10.1007/s11760-014-0618-7, 2015.
- [16] Lin, C.C., Shiu, P.-F. DCT-based reversible data hiding scheme, *J. Softw.*, vol. 5, no. 2, pp. 214–224, Feb. 2010.
- [17] Nikolaidis, A., Reversible data hiding in JPEG images utilising zero quantised coefficients,” *IET Image Process.*, vol. 9, no. 7, pp. 560–568, Jul. 2015.
- [18] Huang, F., Qu, X., Kim, H. J., Huang, J., Reversible data hiding in JPEG images,’ *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technology*, vol. 26, no. 9, september 2016.
- [19] Fridrich, J., *Lossless Data Embedding - New Paradigm*. pp. 185–196, 2002.
- [20] Celik, MU., Sharma, GA., Tekalp, M., Saber, E., Lossless generalized-ISB data embedding. *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 14, no. 2, pp. 253–66, Feb. 2005.
- [21] Wu, X., Memon, N., Context-based, adaptive, lossless image coding, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 4, pp. 437–444, Apr. 1997.
- [22] 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, May 1997.
- [23] Tian, J., Reversible watermarking by difference expansion, *Proceedings of Multimedia and Security Workshop at ACM Multimedia (ACMMM '02)*, pp. 19–22, December 2002.
- [24] Alattar, AM., Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform. *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 13, no. 8, pp. 1147–56, Aug. 2004.

- [25] Tzu-Chuen, L.; Chin-Chen, C. Lossless nibbled data embedding scheme based on difference expansion. *Image Vis. Comput.* 26, 632–638, 2008.
- [26] Kim, HJ., Sachnev, V., Shi, YQ., Nam, J., CHOO, HG., A Novel Difference Expansion Transform for Reversible Data Embedding. *IEEE Trans.*, vol. 3, no. 3, pp. 456–465, 2008.
- [27] Lin, CC., Yang, SP., Hsueh, NL., Lossless Data Hiding Based on Difference Expansion without a Location Map. *2008 Congr. Image Signal Process.*, pp. 8–12, 2008.
- [28] El-Sayed, H. S., El-Zoghdy, S. F., Faragallah, O. S., Adaptive Difference Expansion-Based Reversible Data Hiding Scheme for Digital Images. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(3), 1091–1107. doi:10.1007/s13369-015-1956-7,2016.
- [29] 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.
- [30] Fallahpour, M., Sedaaghi M. H., High capacity lossless data hiding based on histogram modification, *IEICE Electron. Exp.*, vol. 4, no. 7, pp. 205–210, 2007.
- [31] Lee, S.-K., Suh, Y.-H., Ho, Y.-S., Reversible image authentication based on watermarking, in *Proc. IEEE Int. Conf. Multimedia Expo*, , pp. 1321–1324, Jul. 2006.
- [32] Chang, C. C., Lin C. C., Tai, W. L., Multilevel reversible data hiding based on histogram modification of difference images, *Pattern Recognition*, vol. 41, pp.3582-3591,2008.
- [33] 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.
- [34] Shi, Y. Q., Li, X., Zhang, X., Wu, H. T., Ma, B., Reversible data hiding: Advances in the past two decades, in *IEEE Access*, vol. 4, no. , pp. 3210-3237, doi: 10.1109, 2016.
- [35] Khan A., Siddiqa A., Munib S., Malik S.A., A recent survey of reversible watermarking techniques, In *Information Sciences*, Volume 279, Pages 251-272, ISSN 0020-0255, 2014.
- [36] Thodi, D. M., and Rodriguez, J. J., Prediction-error based reversible watermarking, in *Proc. IEEE Int. Conf. Inf. Process.*, pp. 1549–1552, Oct. 2004.

- [37] Thodi D.M., Rodriguez, J. J., Expansion embedding techniques for reversible watermarking, *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 16, no. 3, pp. 721–730, Mar. 2007.
- [38] Weinberger, MJ., 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.
- [39] Luo, L., Chen, Z., Chen, M., Zeng, X., Xiong, Z., Reversible Image Watermarking Using Interpolation Technique. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 5, no. 1, pp. 187–193, 2010.
- [40] Sachnev, V., Kim, H. J., Nam, J., Suresh, S., Shi, Y. Q. Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction, *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 19, no. 7, pp. 989–999, Jul. 2009.
- [41] Dragoi I. C., and Coltuc, D., Local-prediction-based difference expansion reversible watermarking, *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 23, no. 4, pp. 1779–1790, Apr. 2014.
- [42] Dragoi, I. C., and Coltuc, D., On local prediction based reversible watermarking, *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 24, no. 4, pp. 1244–1246, Apr. 2015.
- [43] 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.
- [44] Weinberger, M., Seroussi, G., and Sapiro, S., LOCO-I: A low complexity, context-based, lossless image compression algorithm, in *Proc. IEEE Data Compression Conf.*, pp. 140–149, 1996.
- [45] Weinberger, MJ., 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.
- [46] Hong W., Chen T.S., and Shu C.W., 2009. Reversible data hiding for high quality images using modification of prediction errors. *J. Syst. Softw.* 82, 11, November 2009.
- [47] 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.
- [48] Fallahpour, M., Reversible image data hiding based on gradient adjusted prediction, *IEICE Electron. Exp.*, vol. 5, no. 20, pp. 870–876, 2008.

- [49] Coltuc D., Improved embedding for prediction based reversible watermarking, *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 6, no. 3, pp. 873–882, Sep. 2011.
- [50] Vrcelj, B., and Vaidyanathan, P. P., Efficient implementation of all-digital interpolation, *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 10, no. 11, pp.1639–1646, Nov. 2001.
- [51] Zhang, L., Wu, X., An edge-guided image interpolation algorithm via directional filtering and data fusion. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 15(8):2226–2238, Aug 2006.
- [52] Kamstra, L., and Heijmans, H. J. A. M., Reversible data embedding into images using wavelet techniques and sorting, *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 14, no. 12, pp. 2082–2090, Dec. 2005.
- [53] Hong, W., An efficient prediction-and-shifting embedding technique for high quality reversible data hiding, *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2010, article ID 104835, Feb. 2010.
- [54] Pei, Q., Wang, X., Li, Y., and Li, H., Adaptive reversible watermarking with improved embedding capacity, *J. Syst. Softw.*, vol. 86, no. 11, pp. 2841–2848, 2013.
- [55] Ou, B., Li, X., Zhao, Y., Ni, R., and Shi, Y.-Q., Pairwise prediction error expansion for efficient reversible data hiding,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 22, no. 12, pp. 5010–5021, Dec. 2013.
- [56] Li, X., Zhang, W., Gui, X., and Yang, B., A novel reversible data hiding scheme based on two-dimensional difference-histogram modification, *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 8, no. 7, pp. 1091–1100, Jul. 2013.
- [57] Wang, X., Li, X., Yang, B., Guo, Z., Efficient generalized integer transform for reversible watermarking. *Signal Processing Letters, IEEE* 17, 567–570. 2010.

ÖZGEÇMİŞ

Can Yüzkollar, 1981 yılında Adapazarı'nda doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini sırayla Mehmet Nuri İlkokulu, Atatürk Ortaokulu ve Ali Dilmen Lisesi'nde tamamladı. 2004 yılında Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünü bitirdi. Askerlik görevinin ardından işe başladığı Sakarya Üniversitesi'nde halen öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli, Ceyda ve Mustafa Mert adında iki çocuk babasıdır.