

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TERSİNİR VİDEO DAMGALAMA

DOKTORA TEZİ

Burhan BARAKLI

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cabir VURAL

Mart 2014

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERSİNİR VİDEO DAMGALAMA

DOKTORA TEZİ

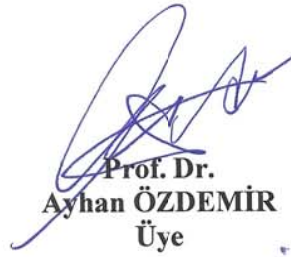
Burhan BARAKLI

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 14 / 03 / 2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Etem KÖKLÜKAYA
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Ayhan ÖZDEMİR
Üye



Doç. Dr.
Cabir VURAL
Üye



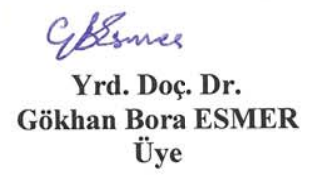
Doç. Dr.
Kemal GÜLLÜ
Üye



Yrd. Doç. Dr.
Serap KAZAN
Üye



Yrd. Doç. Dr.
İrfan YAZICI
Üye



Yrd. Doç. Dr.
Gökhan Bora ESMER
Üye

ÖNSÖZ

Sayısal video damgalama konusunda çalışmamı destekleyen ve çalışmalarım süresince bilgilerini benimle paylaşan, çalışmalarımı yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Cabir VURAL'a teşekkür ederim.

Ayrıca haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim anne ve babama, çalışmalarım esnasında gösterdiği sabırdan ve desteğinden dolayı sevgili eşime, hayatımıza neşe katan oğlum Ömer Bahadır Baraklı'ya, kardeşlerim Erdem ve Serdar Baraklı'ya, çalışma arkadaşlarım ve dostlarım Can Yüzkollar, İbrahim Yıldırım, Ömer Faruk Çomaklı, Ahmet Küçüker'e ve Işık ailesine sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
TERSİNİR DAMGALAMA	5
2.1. Giriş	5
2.2. TD'nin Arkasındaki Fikir	5
2.3. Tersinir Görüntü Damgalama Algoritmaları	6
2.3.1. VS yöntemi ile TGD	7
2.3.2. FG yöntemine dayalı TGD	9
2.3.3. HD yöntemine dayalı TGD.....	17
2.3.4. ÖHG yöntemine dayalı TGD yöntemleri.....	21
2.4. TVD Algoritmaları	26
2.4.1. Videoda çerçeve öngörüsünün hesaplanması	28
2.4.2. Chung ve diğerlerinin TVD yöntemi	29
2.4.3. Zeng ve diğerlerine ait TVD.....	31
BÖLÜM 3.	
HAREKET DENGELENMİŞ ARADEĞERLEME HATALARININ GENİŞLETİLMESİNE DAYALI TERSİNİR DAMGALAMA.....	34

3.1. Giriş	34	
3.2. Hareket Dengelenmiş Çerçeve Aradeğerleme	35	
3.3. Önerilen Yöntem	37	
3.3.1. TVD için çerçeve aradeğerleme	37	
3.3.2. Çerçevelerin kapasite parametrelerinin belirlenmesi	39	
3.3.3. Damga ekleme	41	
3.3.4. Yan bilginin oluşturulması.....	45	
3.3.5. Damga çıkarımı ve orijinal video çerçevelerinin oluşturulması...	46	
3.4. Deneysel Sonuçlar.....	51	
3.5. Tartışma.....	59	
BÖLÜM 4.		
HAREKET DENGELENMİŞ ÖNGÖRÜ HATALARININ UYARLANIR GENİŞLETİLMESİNE DAYALI TERSİNİR DAMGALAMA VE PİKSEL SEÇME		60
4.1. Giriş	60	
4.2. Önerilen Yöntem.....	61	
4.2.1. Blok sınıflandırma	61	
4.2.2. Piksel seçme	62	
4.2.3. Damga ekleme	64	
4.2.4. Optimal zamansal uyarlanırlar ekleme eşik değerinin belirlenmesi.	69	
4.2.5. Yan bilginin oluşturulması.....	69	
4.2.6. Damga Çıkartımı	70	
4.3. Deneysel Sonuçlar	73	
4.4. Tartışma.....	80	
BÖLÜM 5.		
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81	
KAYNAKLAR.....	84	
ÖZGEÇMİŞ	88	

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ATDD	Ayrık tamsayı dalgacık dönüşümü
BEA	Blok eşleşme algoritması
BPP	Piksel başına düşen bit miktarı
BTH	Blok tipini gösteren harita matrisi
HD	Histogram değiştirme
HDA	Hareket dengelemiş aradeğerleme
HDÇA	Hareket dengelemiş çerçeve aradeğerleme
HDÇÖ	Hareket dengelemiş çerçeve öngörüsü
HDMÖH	Hareket dengelenmiş mutlak öngörü hatası
HDÖ	Hareket dengelemiş öngörü
HDÖH	Hareket dengelenmiş öngörü hatası
HDZSS	Hareket dengelenmiş zamansal standart sapma
HDZYSS	Hareket dengelenmiş zamansal yerel standart sapma
ÖHG	Öngörü hatasının genişletilmesi
PSNR	Tepe işaret gürültü oranı
SD	Sayısal damgalama
SKHG	Sıkıştırılmış kuantalama hatası görüntüsü
TD	Tersinir damgalama
TGD	Tersinir görüntü damgalama
TVD	Tersinir video damgalama
VS	Veri sıkıştırması
b	Bit
B_{kd}	k . çerçevenin d . bloğu
\hat{B}_{kd}	k . çerçevenin d . hareket dengelenmiş bloğu
B_{fk}	k . çerçevedeki düzgün bloklar kümesi
B_{rk}	k . çerçevedeki düzgün olmayan bloklar kümesi

$bsç$	Son çerçevenin belirlenmesini sağlayacak bir bayrak
BSS_{kd}	k . çerçevenin d . bloğuna aid HDZSS
C_k	k . çerçeveye ait kapasite (damga + yan bilgi)
D_{kd}	HDÖH görüntüsü
D_{kd}^w	Damgalı HDÖH görüntüsü
e	Fark değeri
e^w	Damgalı fark değeri
E_{Bf}	Düzgün bir bloktaki genişleyebilen pikseller kümesi
E_{Br}	Düzgün olmayan bir bloktaki genişleyebilen pikseller kümesi
$E_k(t)$	t kapasite parametresine göre genişleyebilen pikseller kümesi
F_k	k . çerçeve
\hat{F}_k	k . çerçevenin hareket dengelenmiş öngörüsü
F_k^w	Damgalı k . çerçeve
h	Fark genişletme yöntemindeki fark değeri
h^w	Fark genişletme yöntemindeki damgalı fark değeri
H_k	k . çerçevenin öngörü veya aradeğerleme hatası
$hist(F)$	F çerçevesinin histogramı
i	Piksel indisi
j	Piksel indisi
k	Çerçevenin sırasını gösteren bir sayı
$lp1_k$	Damganın eklendiği son konumu saklayan bir değişken
$lp2_k$	Damganın eklendiği son konumu saklayan bir değişken
LSB_{F_k}	F_k çerçevesine ait en az anlamlı bitlerini saklayan bir dizi
M ve N	Çerçeve boyutu
MD_{kd}	HDMÖH görüntüsü
MD_{kd}^w	Damgalı HDMÖH görüntüsü
MVs	Hareket vektörlerini temsil eden bir dizi
n	Video dizisindeki çerçeve sayısı
N_c	Video dizisine eklenecek damga miktarı
N_k	k . çerçevedeki bir komşuluk
N_s	Bir komşuluktaki piksel sayısı
NYO	Bir komşuluğa ait piksellerin ortalama değeri

$O_k(t)$	t kapasite parametresine göre taşma olan pikseller kümesi
P_k	k . çerçeveye eklenebilecek damga biti miktarı
P_{kd}	HD yönteminde k . çerçevenin d . bloğunun histogramın tepe noktası
s	Pencere boyutu
son	Kapasite parametresinin arttırıldığı son çerçeveyi gösteren bir değişken
$S_k(t)$	t kapasite parametresine göre ötelenebilen pikseller kümesi
t	Kapasite parametresi
T_{cp}	Kapasite parametresi
V	Video dizisi
V^w	Damgalı video dizisi
x	Piksel değeri
x^w	Damgalı x pikselinn değeri
y	Piksel değeri
y^w	Damgalı y pikselinn değeri
YB_k	k . çerçeye ait yan bilgi dizisi
YSS	HDZYSS
Δ_{aet}	Uyarlamalı damgalamaya ait eşik değeri
Δ_{pst}	Piksel seçmede kullanılan eşik değeri

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Tersinir damga ekleme algoritmasının genel gösterimi	6
Şekil.2.2. Tersinir damga çıkarma algoritmasının genel gösterimi ve orijinal görüntünün geri elde edilmesi	6
Şekil 2.3. Sıkıştırma temelli tersinir görüntü damgalamanın 4x4 boyutlarında bir görüntü için uygulaması [13]	8
Şekil 2.4. FG yöntemine dayalı TD ekleme algoritmasının genel gösterimi	11
Şekil 2.5. Fark değerlerinin 4 farklı kümeye ayrılması.....	12
Şekil 2.6. Histogram değiştirmeye dayalı damga çıkartma algoritmasının genel gösterimi.....	15
Şekil 2.7. (a)'da 512×512 boyutlarındaki gri seviyeli orijinal Lena görüntüsü (b)'de 101089 bit eklenmiş (0.39 bpp – 44.20 dB), (c)'de 222042 bit eklenmiş (0.85 bpp – 32.54 dB), (d)'de 516794 bit eklenmiş (1.97 bpp – 16.75 dB).....	17
Şekil 2.8. Lena görüntüsüne ait histogram.....	18
Şekil 2.9. HD'ye karşılık gelen blok diyagram (a) damga ekleme (b) damga çıkartımı	18
Şekil 2.10. Orijinal görüntünün histogramı.....	19
Şekil 2.11. Kaydırılmış histogram.....	20
Şekil 2.12. Damgalanmış görüntünün histogramı.....	20
Şekil 2.13. Bir pikselin öngörüsünün hesaplanmasında kullanılan pikseller	22
Şekil 2.14. ÖHG histogramının genel şekli (hesaplamalar lena görüntüsü için yapılmıştır).	23
Şekil 2.15. (a) Öngörü hatası histogramında $t=1$ olması durumunda seçilen hatalar koyu olan bloklardır. (b) Histogram ötelemeyi göstermekte (c) Damgalı öngörü hatasının histogramıdır. (d) Öngörü hatası histogramında $t=2$ olması durumunda seçilen hatalar koyu olan bloklardır. (e) Histogram ötelemeyi göstermekte (f) Damgalı öngörü hatasının histogramıdır.	24

Şekil 2.16. TGD yöntemlerinin Lena görüntüsüne ait performansı.....	27
Şekil 2.17. TGD yöntemlerinin Baboon görüntüsüne ait performansı	27
Şekil 2.18. BHK'ya ait bir blok ve en iyi eşleşen bloğun gösterimi.....	29
Şekil 2.19. (a) Fark bloğu histogramı (b) Mutlak fark bloğu histogramı.....	30
Şekil 3.1. İki çerçeve durumunda HDÇA'ya karşılık gelen blok diyagram	36
Şekil 3.2. Damga ekleme ve çıkartma esnasında aynı aradeğerleme hatası elde etmek amacıyla sadece çift numaralı çerçevelerin aradeğerlenmesi	38
Şekil 3.3. Damga ekleme ve çıkartma esnasında aynı aradeğerleme hatası elde etmek amacıyla tüm çerçevelerin aradeğerlenmesi. Damga ekleme ilk çerçeveden son çerçeveye doğru yapılırken, damga çıkartımı son çerçeveden ilk çerçeveye doğru gerçekleştirilir.....	38
Şekil 3.4. Bir çerçeve için damga eklemeye ait blok diyagram	42
Şekil 3.5. Yan bilgileri temsil etmek için gerekli bit miktarları	46
Şekil 3.6. Bir çerçeve için damga çıkarma ve orijinal videonun oluşturulmasına ait blok diyagram.....	47
Şekil 3.7. Bir video dizisinin önerilen yöntem ile damgalanmasına ait blok diagram	49
Şekil 3.8. Bir video dizisinden önerilen yöntem ile damga çıkarılması ve orijinal videonun oluşturulması	50
Şekil 3.9. Önerilen yöntemin performansını incelemek amacıyla kullanılan test videolarından örnek çerçeveler	51
Şekil 3.10. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Akiyo dizisi için performansı	52
Şekil 3.11. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Foreman dizisi için performansı	52
Şekil 3.12. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Hall Monitor dizisi için performansı ...	53
Şekil 3.13. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Bus dizisi için performansı.....	53
Şekil 4.1. $Fk(i, j)$ pikselinin hareket dengelenmiş komşuluğunun $Nk(i, j)$ gösterimi.....	63
Şekil 4.2. Önerilen yöntemde damga eklemeye ait yapı. Damgalama ilk çerçeven son çerçeveye doğru gerçekleştirilir.	64
Şekil 4.3. Önerilen yöntemin uyarlanırlı damga ekleme diyagramı.....	64
Şekil 4.4. Damga çıkartma esnasında damga eklemede kullanılan aynı öngörü hatasını elde etmek amacıyla gerçekleştirilen damgalama yapısı. Damga ekleme ilk çerçeveden son çerçeveye doğru yapılırken, damga çıkartımı son çerçeveden ilk çerçeveye doğru gerçekleştirilir.....	70

Şekil 4.5. Simülasyon çalışmalarında kullanılmış test videolarına ait ilk çerçeveler	73
Şekil 4.6. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Bus dizisi için performansı.....	75
Şekil 4.7. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Flower dizisi için performansı.....	75
Şekil 4.8. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Football dizisi için performansı.....	76
Şekil 4.9. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Harbour dizisi için performansı.....	76
Şekil 4.10. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Ice dizisi için performansı	77
Şekil 4.11. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Paris dizisi için performansı	77

ÖZET

Anahtar kelimeler: Tersinir video damgalama, uyarlanır tersinir video damgalama, hareket dengelenmiş öngörü hatasının genişletilmesi, hareket dengelenmiş aradeğerleme hatasının genişletilmesi.

Bu tezde, sayısal bir videoda arka arkaya gelen çerçeveler arasındaki zamansal ilintiden faydalanan tersinir iki video damgalama algoritması geliştirilmiştir. İlk algoritma, hareket dengelenmiş zamansal aradeğerleme hatalarının genişletilmesine dayalıdır. Yöntemde, damaga çıkartma ve orijinal videoyu geri elde etmek için gereken yan bilgi miktarı oldukça azdır. İkinci algoritma, hareket dengelenmiş öngörü hatalarının genişletilmesine dayalı uyarlanır bir yöntemdir. Öngörü hatalarının aldığı değerlerden bağımsız olarak, hareket dengelenmiş öngörü çerçevelerindeki tüm bloklara aynı damgalama algoritmasını uygulayan mevcut tersinir video damgalama yöntemlerinin aksine, ikinci algoritma öngörü hatalarının aldığı değerlere göre blokları farklı iki şekilde damgalamaktadır. Bu amaçla, bloklar düzgün ve düzgün olmayan şekilde iki sınıfa ayrılmıştır. Düzgün blokların belirli piksellerine 2-bit damgalama, düzgün olmayan blokların belirli piksellerine ise 1-bit damgalama uygulanarak damgalama kapasite arttırılmıştır. Ayrıca, yüksek bozunuma sebep olan pikseller belirlenip bu pikseller damgalamada kullanılmayarak damgalama sonucu orijinal videoda oluşan bozunum azaltılmıştır. Geliştirilen yöntemlerin, literatürdeki mevcut yöntemlere göre kapasite ve orijinal videoda oluşan bozunum bakımlarından üstün olduğu bilgisayar benzetimleriyle gösterilmiştir. Geliştirilen algoritmalar birbirleriyle de karşılaştırılıp üstün ve zayıf olduğu yönler belirlenmiştir.

REVERSIBLE VIDEO WATERMARKING

SUMMARY

Key Words: Reversible video watermarking, adaptive reversible video watermarking, motion-compensated prediction error expansion, motion-compensated interpolation error expansion

In this dissertation, two reversible video watermarking algorithms exploiting temporal correlation existing among consecutive frames in digital videos were developed. The first algorithm is based on motion-compensated temporal interpolation error expansion. The algorithm has a low amount of side information required for watermark decoding and video restoration. The second algorithm is an adaptive method based on motion-compensated prediction error expansion. Unlike the current reversible video watermarking algorithms that apply the same watermarking method to all blocks in the motion-compensated prediction frames, the second algorithm watermarks the blocks with two different methods depending on their motion-compensated prediction errors. Blocks were classified as smooth and non-smooth for this purpose. Watermarking capacity was increased by applying a 2-bit watermarking strategy to some pixels of smooth blocks and a 1-bit watermarking strategy to some pixels of non-smooth blocks. Furthermore, pixels causing high distortion were detected and they were not used during watermarking to minimize the distortion occurring in the original video as a result of watermarking. Both algorithms were shown to be superior to the existing reversible watermarking algorithm in terms of capacity and distortion occurring in the original video by means of computer simulations. Both algorithms were also compared to each other and their strong and weak aspects were determined.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnternet ve sayısal çoklu ortam teknolojilerindeki gelişmeler ve bu teknolojilerin yaygınlaşması sayısal görüntü, video ve ses işaretlerinin kopyalanmasını ve paylaşımını kolaylaştırmıştır. Sayısal veriler, kayıpsız olarak kopyalanabilmekte ve çok hızlı bir şekilde dağıtılabilmektedir. Bu nedenle, sayısal çoklu ortam üreticilerinin haklarının korunması ve hassas veriler ile ilgilenilen uygulamalarda veri güvenilirliğinin sağlanması önemli bir problem olmuştur [1-4]. Veri koruma tekniklerinden biri olan şifreleme, sayısal bilgilerin korunmasında tek başına yeterli olmamaktadır [5]. Çünkü şifrelenmiş veri çözüldükten sonra veri için koruma artık söz konusu değildir. Sayısal damgalama (SD), şifrelemeyi tamamlayıcı bir teknolojidir. SD, herhangi bir sayısal işarete işaretin anlamını bozmayacak şekilde sayısal bir bilgi ekleme olarak tanımlanabilir [1]. Sayısal bir işarete eklenen damga, işaretle birlikte mevcut olduğundan, işaret anlamsız olacak derecede bozulmadığı sürece yasadışı kopyalama ve dağıtma girişimlerine karşı işareti koruyacaktır. Farklı uygulama alanları için geliştirilmiş çeşitli SD yöntemleri mevcuttur. Sayısal çoklu ortam üreticilerinin haklarının korunmasına imkân veren telif hakkı koruma, yasal olmayan kopyaların kim tarafından yapıldığının belirlenmesini sağlayan kimlik tespiti ve yasal olmayan kopyalamaları donanım kontrolüyle engelleyen kopyalama koruma en yaygın olarak kullanılan sayısal damgalama uygulamalarıdır. Ayrıca, otomatik bir denetleme sistemiyle ticari reklamların sözleşmedeki gibi yayınlanıp yayınlanmadığının tespitine imkân veren yayın denetleme, sayısal bir verinin orijinal olup olmadığının belirlenmesini sağlayan veri doğrulama, sayısal medyanın veri tabanlarında hızlı bir şekilde aranabilmesini mümkün kılan indeksleme, gizli verilerin güvenli iletiminde kullanılan veri gizleme SD uygulamaları da giderek yaygınlaşmaktadır [1,4,6].

Farklı damgalama uygulamaları farklı gereksinimlere sahiptir. Bir SD yöntemindeki gereksinimler algısal saydamlık, dayanıklılık ve kapasite olarak verilebilir [7].

Algısal saydamlık, orijinal veri ile damgalı veri arasındaki algısal benzerlik olarak tanımlanır. Dayanıklılık, damgalı verinin kasıtlı ve kasıtlı olmayan saldırılara kalması durumunda bile damganın damgalı veriden geri elde edilebilmesini ifade etmektedir. Kapasite, orijinal bir veride saklanabilecek maksimum bilgi miktarı olarak tanımlanır. Verilen bir SD uygulamasında, bu gereksinimlerin hepsini aynı anda sağlamak mümkün değildir. Verilen uygulama, tasarımcının hangi gereksinime öncelik vermesi gerektiğini belirleyecektir.

Herhangi bir SD yönteminde, veri ekleme neticesinde orijinal işaret değiştirilmektedir. Damga çıkartma veya tespiti esnasında orijinal işaret hatasız olarak geri elde edilemeyebilir. Orijinal işaretle oluşan hatalar önemli uygulamalarda arzulanmaz. Örneğin, askeri bir uygulamada kullanılan sayısal bir görüntü üzerinde oluşacak bozulmalar hedef yerini değiştirip telafisi mümkün olmayan sonuçlara neden olabilir. Benzer şekilde, hastalık teşhisi için kullanılan tıbbi bir görüntüde oluşacak yapaylıklar doktorun yanlış teşhis yapmasına yol açabilir. Hassas verilerin kullanıldığı bu tür uygulama alanları için geliştirilmiş ve damgalanmış işaretle orijinal işaretin hatasız olarak geri elde edilebildiği yöntemler genel olarak tersinir (kayıpsız) damgalama (TD) olarak adlandırılmaktadır [8]. TD yöntemlerinin kullanım alanlarının başında, orijinal veride kaybın oluşması istenilmeyen askeri ve tıbbi uygulamalar gelmektedir. TD, sayısal ses, görüntü ve video için gerçekleştirilebilir. Ancak TD araştırmalarının büyük bir çoğunluğu sayısal görüntü için yapılmıştır. Tersinir video damgalama (TVD) konusunda sınırlı sayıda çalışma vardır. Bu nedenle, TVD son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu tezde özgün TVD yöntemleri geliştirilmiştir.

Bilindiği üzere, sayısal bir videonun sayısal bir haberleşme kanalından iletmek için gerekli iletim band genişliğini ve sayısal bir videonun kaydı için gerekli hafıza miktarını azaltmak amacıyla sayısal video genelde kayıplı sıkıştırma yöntemleri kullanılarak sıkıştırılmaktadır. Ancak, kayıplı olarak sıkıştırılmış bir videodan orijinal videoyu damgalama olmasa bile hatasız olarak geri elde etmek mümkün olmadığından sıkıştırılmış video bu tezin kapsamı dışında bırakılmıştır. Bu tezde geliştirilecek yöntemler video sıkıştırma standartları dikkate alınarak sıkıştırılmış videolara da uyarlanabilir.

Görüntü için geliştirilmiş TD yöntemlerinin çoğu, fark genişletme (FG) ve histogram değiştirme (HD) ve öngörü hatasının genişletilmesi olarak bilinen ana üç yaklaşıma dayanmaktadır. Bu üç yöntemin arkasındaki temel fikir, görüntünün temsil yöntemini değiştirerek yeni temsilde boşluklar oluşturmak ve oluşan boşluğa damgayı eklemektedir. Daha sonra orijinal temsile geri dönülerek damgalanmış görüntü oluşturulur. Tersinir görüntü damgalama (TGD) yöntemleri boşluk oluşturmak amacıyla görüntüde pikseller arasında mevcut olan uzamsal ilintiden faydalanır.

Bir videoda uzamsal ilintiye ek olarak arka arkaya gelen çerçeveler arasında zamansal ilintide mevcut olduğundan, TGD yöntemleri video çerçevelerine tek tek uygulandığında başarılı sonuç elde edilemez. Bu nedenle, damgalamadan önce çerçeveler arası ilintinin giderilmesi gereklidir. Sayısal bir videoda, çerçeveler arasındaki ilinti genelde hareketten kaynaklandığından, hareket dengelemeli aradeğerleme (HDA) ve hareket dengelemeli öngörü (HDÖ) kullanarak çerçeveler arası ilinti giderilebilir. Bu tezde her iki yaklaşımın da TVD amacıyla nasıl kullanılabileceği detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Tez aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. TVD yöntemleri genelde TGD yöntemlerine dayalı olduğundan Bölüm 2’de, ilk önce TGD yöntemlerinin özeti verilmiştir. Daha sonra mevcut TVD yöntemleri tartışılmıştır.

Bölüm 3’de HDA tabanlı yeni bir TVD yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen algoritmada boşluk oluşturmak amacıyla mevcut TVD yöntemlerinden farklı olarak HDÖ hatası yerine hareket dengelemeli çerçeve aradeğerleme (HDÇA) hatası kullanılmıştır. Böylece çerçeve arasındaki ilintiden daha etkin bir şekilde faydalanılmıştır. Yöntem, düşük miktarda yan bilgiye ihtiyaç duyduğundan yüksek saf kapasiteye sahiptir. Önerilen çalışma aslında geleneksel öngörü hatasının genişletilmesi yönteminin sayısal videolara uyarlanmasıdır [9]. Ancak algoritmanın açıklandığı Bölüm 3’te belirtildiği gibi çalışma videoya uyarlandığında iki problemle (damga ekleme ile çıkartma esnasında aynı HDÇA hatasının kullanılmasının sağlanması ve toplam kapasitenin çerçevelere dağıtılması) karşılaşmıştır. İki problemin çözümü için bu tezde özgün fikirler geliştirilmiştir. Yöntemin mevcut yöntemlerden kapasite-bozunum bakımından üstün olduğu benzetimlerle gösterilmiştir.

Bölüm 4’te HDÖ tabanlı yeni bir TVD yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen çalışma X. li ve ark. tarafından sunulan algoritmaların sayısal videoya uyarlanmasıdır [10]. Bu çalışmada görüntü pikselleri öngörü hatalarına göre düzgün ve düzgün olmayan iki kümeye ayrılmaktadır. Ardından düzgün bölgedeki bazı piksellere 2 bit, kötü bölgedeki bazı piksellere 1 bit eklenerek uyarlanır damgalama yapılmaktadır. Diğer bir deyişle, yüksek ve düşük öngörü hatasına sahip pikseller farklı şekillerde damgalanmaktadır. Ayrıca genişleyebilen piksellerden sadece bazıları damgalanıp ötelenen piksel sayısı azaltılarak görüntü kalitesi iyileştirilmektedir. Ancak referans çalışma videoya uyarlandığında dört problemle karşılaşmaktadır: (i) videoda damga ekleme ve çıkarma esnasında aynı öngörü hatasının nasıl elde edileceği, (ii) toplam kapasitenin video çerçevelerine nasıl dağıtılacağı, (iii) çerçeve blokların düzgün veya düzgün olmayan şekilde nasıl sınıflandırılacağı, (iv) hangi piksellerin öteleme işlemine tabi tutulacağı belirleneceği. Bu tezde dört problemin çözümü için özgün fikirler geliştirilmiştir. Yöntemin, Bölüm 3’te geliştirilen yöntemden daha iyi sonuçlar verdiği bilgisayar benzetimleriyle gösterilmiştir.

Bölüm 5’de, tezin TVD alanına yaptığı katkılar sıralanmış ve ileride yapılabilecek çalışmalar özetlenmiştir.

BÖLÜM 2. TERSİNİR DAMGALAMA

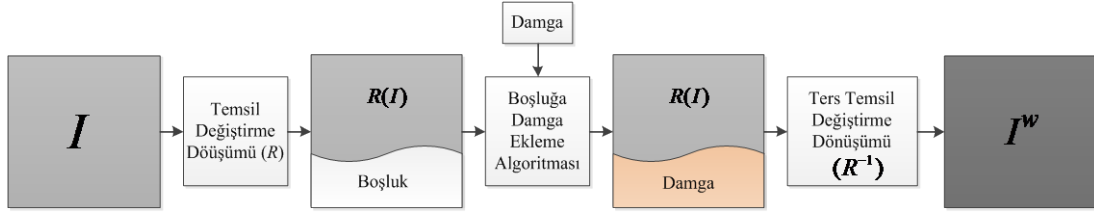
2.1. Giriş

TD, orijinal işarete oluşacak herhangi bir bozulunun telafi edilemeyecek hatalara sebep olabileceği uygulamalarda önem kazanmaktadır. Uzay araştırma ve keşifleri, askeri ve tıbbi uygulamalar veri kaybı arzulanmayan yapılarıyla, tersinir damgalama yöntemlerinin kullanım alanlarının başında gelmektedir.

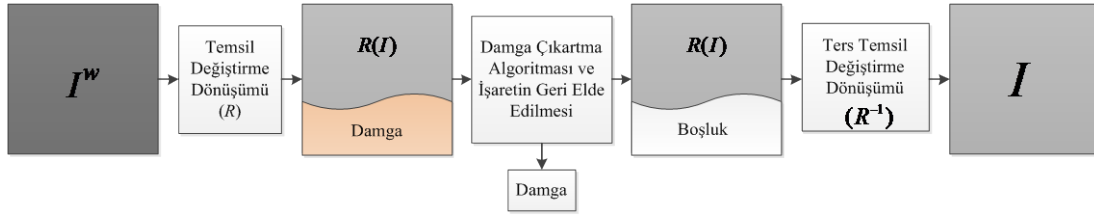
Bu tezde, TVD yöntemleri geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen yöntemler sayısal görüntü için geliştirilmiş TD yöntemlerinin sayısal videoya uyarlanması olarak düşünülebilir. Bu nedenle, tez kapsamında geliştirilen yöntemlerin anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak amacıyla ilk önce TD'nin arkasındaki fikir Kısım 2.2'de ve daha sonra mevcut TGD yöntemleri Kısım 2.3'te tartışılmıştır. Son olarak, Kısım 2.4'te mevcut TVD yöntemleri özetlenmiştir.

2.2. TD'nin Arkasındaki Fikir

TD yöntemlerinin arkasındaki temel prensip, orijinal işareti tanımlı olduğu uzaydan farklı bir uzayda temsil ederek boşluklar oluşturmak ve oluşan boşluğu veri gizlemek için kullanmaktır. Daha sonra, orijinal temsile geri dönülerek damgalanmış işaret oluşturulur. Bu işlem, sayısal bir görüntü için Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Orijinal görüntü I, R ile verilen temsil değiştirme dönüşümüne tabi tutularak görüntünün yeni temsili elde edilir. Şekilde görüldüğü gibi, yeni temsilde boşluk oluşmuştur. Oluşan boşluğa, bilinen bir tersinir damga ekleme algoritmasıyla damga eklenir. Damga eklenmiş yeni temsil, R^{-1} ile verilen ters temsil değiştirme dönüşümüne tabi tutularak I^w ile gösterilen damgalı görüntü elde edilmiş olur. Damgalı görüntüden orijinal görüntü ve damganın geri elde edilmesi Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de açıklanmıştır.



Şekil 2.1. Tersinir damga ekleme algoritmasının genel gösterimi



Şekil 2.2. Tersinir damga çıkarma algoritmasının genel gösterimi ve orijinal görüntünün geri elde edilmesi

Bir TD yönteminin performansını temsil değişirme dönüşümü ile damga ekleme yöntemi belirler. Boşluğun miktarını (eklenebilecek bilgi miktarı) temsil değişirme dönüşümü, işarette oluşacak bozunumu damga ekleme yöntemi belirler. Bir sonraki kısımda görüntü için geliştirilmiş yöntemlerin özeti verilmiştir.

2.3. Tersinir Görüntü Damgalama Algoritmaları

Mevcut TGD yöntemleri, veri sıkıştırması (VS), fark genişletmesi (FG), histogram değişirme (HD) ve öngörü veya aradeğerleme hatalarının genişletilmesi (ÖHG) şeklinde dört guruba ayrılabilir.

TGD yöntemlerinin performansını karşılaştırmak amacıyla, piksel başına bit sayısı (BPP) ve tepe-ışaret-gürültü-oranı (PSNR) ölçütleri kullanılmaktadır. $M \times N$ boyutundaki sayısal bir görüntü için BPP

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

ile hesaplanır. PSNR desibel cinsinden

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{255 \times 255}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - I^w(i,j)]^2} \right) \quad (2.2)$$

denkleminde hesaplanır. Denklem (2.2)'de $I(i, j)$ orijinal piksel değerini, $I^w(i, j)$ damgalı piksel değerini temsil etmektedir.

2.3.1. VS yöntemi ile TGD

Bu gruba giren yöntemlerdeki temsil değıştirme dönüşümü herhangi bir kayıpsız sıkıştırma algoritmasıdır. Kayıpsız sıkıştırmaya dayalı çeşitli TGD yöntemi geliştirilmiştir [11,14]. Bu kısımda Çelik ve ark. tarafından geliştirilen kayıpsız sıkıştırmaya dayalı TGD yöntemi tanıtılacaktır [14]. Orijinal görüntünün 4x4 boyutlarında olduğu varsayılarak damga eklemenin detayları bir örnek üzerinde aşağıda verilmiştir ve özet olarak Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

1. Bir pikselin parlaklık seviyesi p olmak üzere, görüntü piksellerine Denklem (2.3) ile verilen kuantalama işlemi uygulanır.

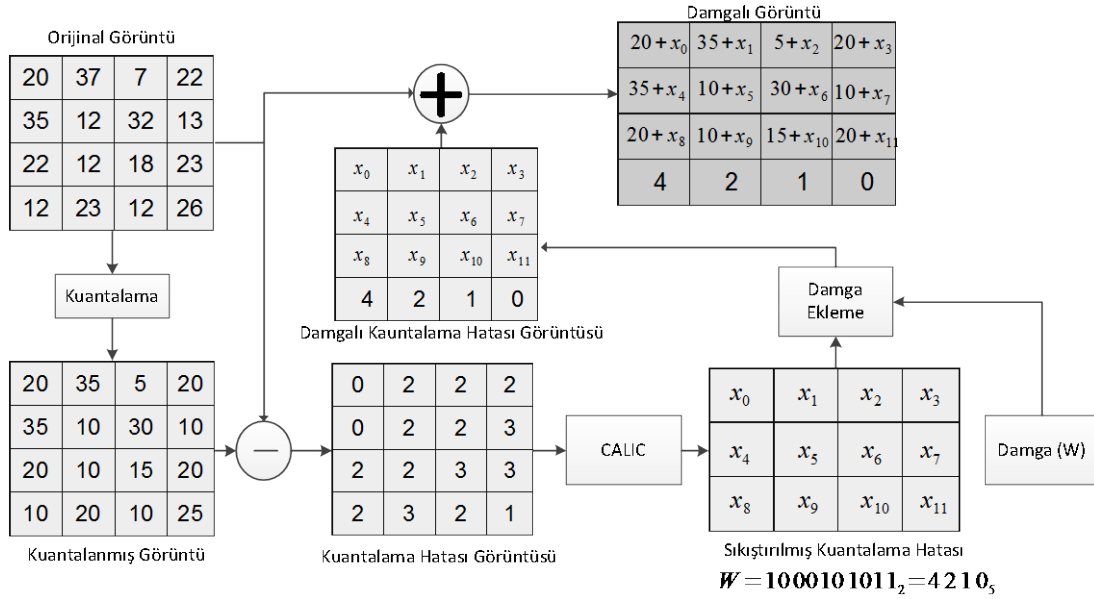
$$Q_L(x) = L \times \left\lfloor \frac{p}{L} \right\rfloor \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'de $[p]$ notasyonu p 'e eşit ya da daha küçük en büyük tamsayıyı göstermektedir. Örneğin, $L = 5$ için orijinal bir görüntü H ve kuantalanmış görüntü Q aşağıda verilmiştir:

$$H = \begin{pmatrix} 20 & 37 & 7 & 22 \\ 35 & 12 & 32 & 13 \\ 22 & 12 & 18 & 23 \\ 12 & 23 & 12 & 26 \end{pmatrix}$$

$$Q = \begin{pmatrix} 20 & 35 & 5 & 20 \\ 35 & 10 & 30 & 10 \\ 20 & 10 & 15 & 20 \\ 10 & 20 & 10 & 25 \end{pmatrix}$$

Daha sonra, kuantalama hatası görüntüsü $R = H - Q$ oluşturulur.



Şekil 2.3. Sıkıştırma temelli tersinir görüntü damgalamanın 4x4 boyutlarında bir görüntü için uygulaması [14]

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

2. Kuantalama hatası görüntüsü CALIC kayıpsız sıkıştırma yöntemi ile sıkıştırılır [15]. CALIC sonrasında oluşan katsayılar x_i ile gösterilsin. Yukarıda verilen örnek için, kuantalama hatası 16 adet olmasına rağmen, Şekil 2.3’de görüldüğü gibi CALIC sonrasında 3×4 boyutlarında sıkıştırılmış kuantalama hatası görüntüsü (SKHG) elde edilir (şekilde katsayılar $\{x_0, x_1, \dots, x_{11}\}$ ile belirtilmiştir).

3. Sıkıştırma işlemi sonucunda satır sayısı 1 azalır. Boş bir satır SKHG’ye eklenerek boyutu tekrar 4×4 yapılır. Eklenen son satır damga eklemek amacıyla kullanılır. Damga genellikle ikili tabanda verilir. Örneğin Şekil 2.3’de damga $W = \{10\ 0010\ 1011\}_2$ olarak belirtilmiştir. Damga L ’lik tabanda temsil edilir. Örneğimiz için ikilik tabandan beşlik tabana geçiş gerçekleştirilir. $\{10\ 0010\ 1011\}_2 = \{4\ 2\ 1\ 0\}_5$ ’dir. 5’lik tabanda temsil edilen damga eklenen son satır olarak alınıp damgalanmış SKHG oluşturulur.

4. Damgalı SKHG, kuantalanmış görüntü ile toplanarak damgalı görüntü elde edilir.

Damga çıkartımında damga eklemedeki ilk adım damgalı görüntüye uygulanarak damgalı kuantalama görüntüsü ve damgalı SKHG oluşturulur. Damgalı kuantalama görüntüsü damga eklemedeki orijinal kuantalanmış görüntüsünün aynısıdır. Damgalı SKHG'nin 3×4 'lük alt bölümüne ters sıkıştırma algoritması uygulanarak orijinal kuantalanma hatası elde edilir. Ardından kuantalama hatası ile kuantalanmış görüntü birleştirilerek orijinal görüntü oluşturulur. Damgalı SKHG'nin son satırının elemanları ikili tabana çevrilerek damga tespit edilir.

2.3.2. FG yöntemine dayalı TGD

Ayrık tamsayı dalgacık dönüşümü (ATDD) olarak da bilinen FG yöntemi Tian tarafından geliştirilmiştir [16]. FG, görüntüdeki komşu iki piksele ATDD uygular. ATDD ile komşu iki pikselin tamsayı ortalaması ve farkı hesaplanır. Fark değeri ikili tabanda bir bit dizisi şeklinde temsil edilebilir. Fark değerine, bir ölçüte göre bit eklenebiliyorsa damga dizisinden bir bit alınarak ekleme işlemi yapılır (fark genişletilir). Görüntülerdeki piksel değerleri, genelde 8 bit ile temsil edildiğinden 0 ile 255 arasında değer alırlar. Fark değerine bit eklenmesi ile bu değer 255 sınırını aşabilir. Bu durumda piksel farkı, bit ekleme yerine bit değişikliği işlemine tabi tutulur. Bit değişikliği, fark değerinin en az anlamlı bitinin damga dizisindeki bitle değiştirilmesidir. Değiştirilmiş farklar ve orijinal ortalamaların ters TADD'si alınarak damgalanmış görüntü elde edilir. Adımlar aşağıda tartışılmıştır.

Damga çözücü, fark değerine eklenen bitleri tespit edilebilmekte, fakat değiştirilen fark değerlerini tespit edememektedir. Bu nedenle, değiştirilen fark değerlerini belirlemek amacıyla, iki boyutlu bir konum haritası tutularak, değişiklik yapılan değerlerin koordinatlarının damga çözücüye iletilmesi gereklidir. Algoritma bir görüntüye uygulandığında damgalanmış görüntü ve konum haritasını oluşturur. Damga çözücü, konum haritası ve damgalanmış görüntüyü kullanarak hem damgayı hem de orijinal görüntüyü hatasız olarak geri elde edebilmektedir.

Bir görüntüde komşu iki pikselin parlaklık seviyesi x ve y , $0 \leq x, y \leq 255$ ile gösterilsin. Piksel çiftinin ATDD'si l ve h ile gösterilip

$$l = \left\lfloor \frac{x+y}{2} \right\rfloor \quad h = x - y \quad (2.4)$$

eşitliklerinden hesaplanır. Ters ATDD

$$x = l + \left\lfloor \frac{h+1}{2} \right\rfloor \quad y = l - \left\lfloor \frac{h}{2} \right\rfloor \quad (2.5)$$

denklemleriyle tanımlanır. Denklem (2.5) aracılığıyla hesaplanan x ve y 'nin [0-255] sınırları dışına taşmaması için

$$0 \leq l + \left\lfloor \frac{h+1}{2} \right\rfloor \leq 255 \quad 0 \leq l - \left\lfloor \frac{h}{2} \right\rfloor \leq 255 \quad (2.6)$$

eşitsizlikleri sağlanmalıdır. Denklem (2.6) düzenlenerek, aşağıda verilen eşdeğer koşullar elde edilir:

$$\begin{cases} |h| \leq 2(255 - l), & 128 < l < 255 \\ |h| \leq 2l + 1, & 0 \leq l \leq 127 \end{cases} \quad (2.7)$$

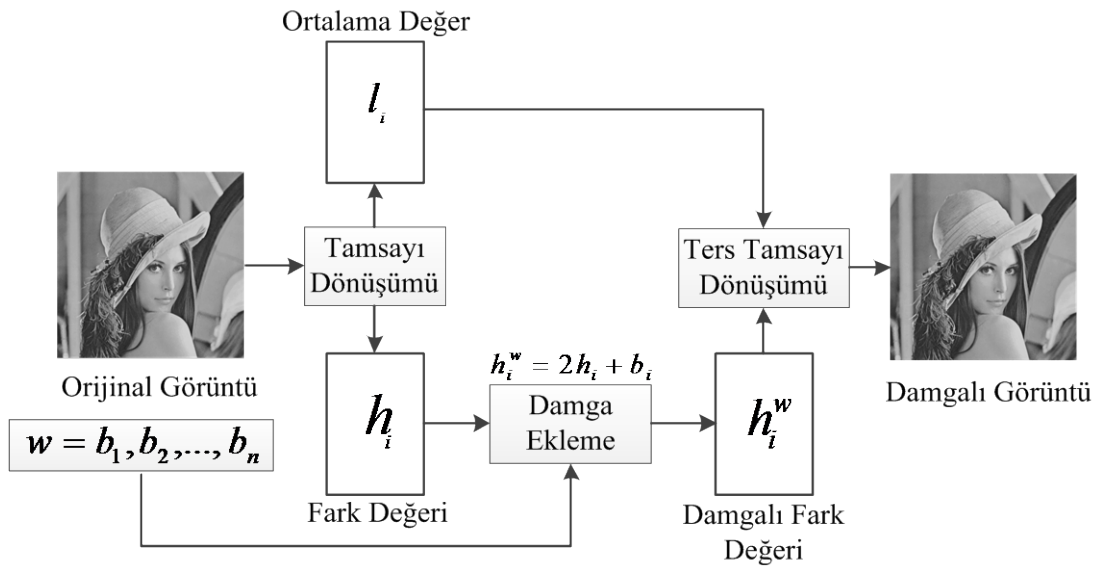
Aşağıda açıklandığı gibi FG yönteminde damgalanmış görüntüde parlaklık seviyelerinin 0 ile 255 aralığının dışına taşmaması garanti edilmektedir. Fark değeri h , damgalanacak bit b olmak üzere damgalanmış fark h^w

$$h^w = 2 \times h + b \quad (2.8)$$

eşitliğiyle ifade edilebilir. Taşmanın oluşmaması için, Denklem (2.6) ve Denklem (2.7)'den

$$|h^w| = \min(2(255 - l), 2l + 1) \quad (2.9)$$

ile verilen koşulun sağlanması gerektiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.4. FG yöntemine dayalı TD ekleme algoritmasının genel gösterimi

Tanım 1: Damga biti b olmak üzere,

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

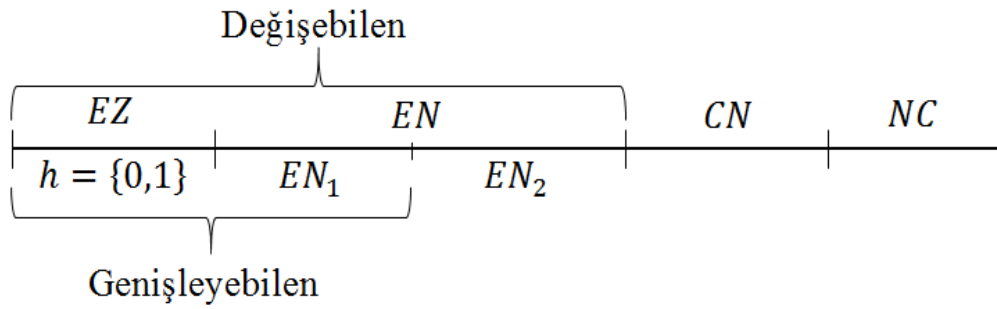
koşulunu sağlayan fark değeri h 'ye genişletilebilir denir.

Tanım 2: Damga biti b olmak üzere

$$\left| 2 \times \left\lfloor \frac{h}{2} \right\rfloor + b \right| \leq \min(2(255 - l), 2l + 1) \quad (2.11)$$

koşulunu sağlayan fark değeri h 'ye değiştirilebilir denir.

Bu tanımlardaki koşulları sağlayan fark değerlerine genişletme veya bit değiştirme işlemi uygulandığında damgalı görüntüdeki parlaklık seviyeleri $[0, 255]$ aralığında olacak ve taşma meydana gelmeyecektir. Şimdiye kadar yapılan tartışma ışığında şu gözlemleri yapmak mümkündür:



Şekil 2.5. Fark değerlerinin 4 farklı kümeye ayrılması

- Değiştirilebilen bir fark değeri h 'ın en az anlamlı biti değiştirilerek oluşturulan fark değeri h değiştirilebilirdir.
- Genişletilebilen bir fark değeri h aynı zamanda değiştirilebilirdir.
- Genişlemiş h , aynı zamanda değişebilendir.
- $h = 0$ veya $h = -1$ olması durumunda, değiştirilebilirlik ve genişletilebilirlik eşdeğerdir.

Damga ekleme, Şekil 2.4'de gösterilmiştir ve detayları aşağıda açıklanmıştır. Adımlar kısaca şu şekildedir: fark değerlerinin hesaplanması, fark değerlerinin dört alt kümeye ayrılması, konum haritasının oluşturulması, en az anlamlı bitlerin (LSB) toplanması/biriktirilmesi, tüm verilerin toplanması.

İlk önce, görüntü üzerindeki tüm pikseller yatay veya dikey yönde ikiye bölünür. Ardından piksel çiftlerine ATDD uygulanarak bir boyutlu fark dizisi h_1, h_2, \dots, h_n elde edilir. İkinci adımda, fark değerleri Şekil 2.5'de gösterildiği gibi EZ, EN, CN ve NC olarak isimlendirilen dört alt kümeye ayrılır:

- EZ kümesi, genişletilebilen $h = 0$ ve $h = -1$ değerlerini içermektedir.
- EN kümesi, EZ kümesi içinde olmayan genişletilebilen tüm h değerlerini kapsamaktadır.
- CN kümesi, değiştirilebilen tüm h değerlerini barındırmaktadır.
 $h \notin (EZ \cup EN)$
- Son olarak NC kümesi değiştirilemeyen tüm h değerlerinden oluşmaktadır.

Üçüncü adımda, bir konum haritası hazırlanır. EZ kümesindeki bir h değerine FG için uygulanabilir. Damgalanacak verinin büyüklüğüne göre EN bölgesinin hepsi damgalama için kullanılmayabilir. EN bölgesinin damga eklenecek kısmı $EN1$, damga eklenmeyecek kısmı $EN2$ olarak belirtilsin. Bir bitlik bir konum haritası oluşturulur. Örneğin, eğer birinci adımda yatay yönde çiftler alınmış ise, konum haritasının genişliği görüntünün genişliğinin yarısı ve yüksekliği ise görüntününki ile aynı olmaktadır. $EZ \cup EN1$ kümesindeki bir h değeri için konum haritasına 1, kümesindeki $EN2 \cup CN \cup NC$ bir h değeri içinse 0 değeri atanır. Konum haritasının boyutunu küçültmek için JBIG2 kayıpsız sıkıştırma algoritması kullanılır.

JBIG2 algoritması sıkıştırılan verilerin sonuna bir bitiş bilgisi koymaktadır. Bu sayede, damga çözücünde konum haritasının yeri kolaylıkla tespit edilebilir. JBIG2 algoritması ile sıkıştırılmış konum haritası bit dizisi L ile temsil edilir.

Dördüncü adımda, $EN2$ ve CN kümesindeki fark değerlerinin en az anlamlı bitleri biriktirilir. Bu dizi C ile temsil edilir.

Beşinci adımda, sıkıştırılmış konum haritası L , orijinal en az anlamlı bitler C ve damga bitleri P ard arda eklenir. Toplam bit dizisi

$$B = L \cup C \cup P = b_1, b_2, \dots, b_m,$$

ile ifade edilebilir, $b_i \in \{0,1\}$, $1 \leq i \leq m$ 'dir.

Fark değerine (h), b bitinin eklenmesiyle damgalanmış fark değeri h^w elde edilir ve bu işleme fark genişletme denmektedir. Genişleyebilen fark değerleri,

$$h^w = 2 \times h + b \tag{2.12}$$

denklemleri ile, değiştirilebilir fark değeri,

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

denklemleri ile damgalanır. Ardından Denklem (2.5) kullanılarak damgalı (x^w) ve damgalı y (y^w) pikselleri elde edilir.

Damga çıkartma algoritmasına karşılık gelen blok diyagram Şekil 2.6'da gösterilmiştir ve detayları aşağıda verilmiştir. Birinci adımda, damgalı görüntüye ATDD uygulanarak bir boyutlu damgalı fark dizisi $\{h_1^w, h_2^w, \dots, h_n^w\}$ elde edilir. Buradaki önemli bir nokta, damga ekleme algoritmasında belirlediğimiz yönde piksel çiftlerine dönüşümün uygulanmasıdır.

İkinci adımda, kesişimleri boş küme olan CH ve NC kümeleri belirlenir

- CN kümesi değiştirilebilen tüm h^w değerlerini içermektedir
- NC ise değiştirilemeyen tüm h^w değerlerini kapsamaktadır.

Üçüncü adımda, CH kümesi içindeki tüm fark değerlerinin en az anlamlı bitleri belirlenir.

Dördüncü olarak, B'deki konum haritası L, JBIG2 algoritması aracılığıyla tespit edilir. Eğer konum haritasındaki değer 1 ise, karşılık gelen farkın genişletilebilir, aksi halde değiştirilemez olduğuna karar verilir.

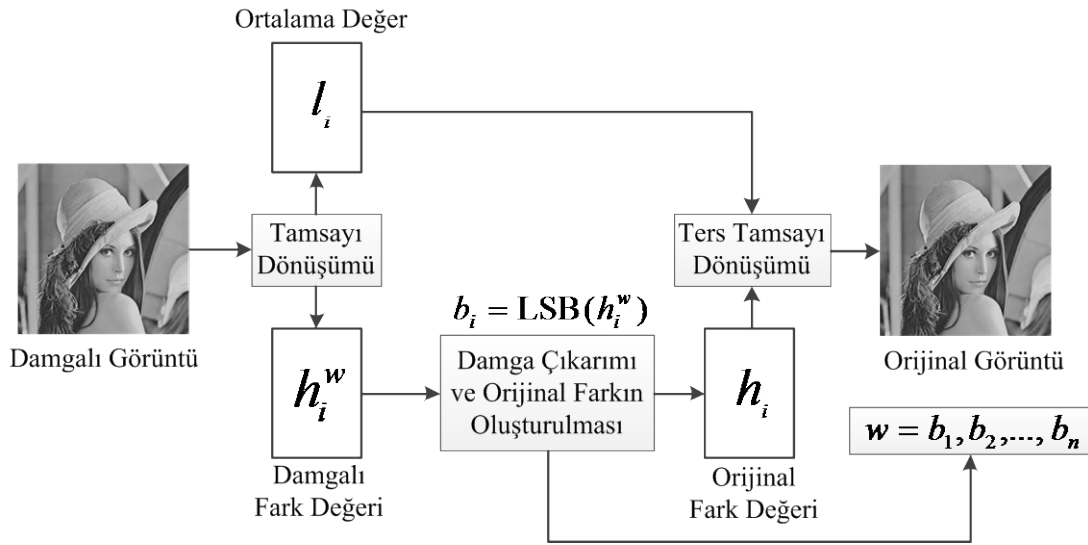
Beşinci adımda ters ATDD uygulanarak görüntü orijinal haline getirilir.

x^w ve y^w piksellerine ATDD dönüşümü

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

ile gerçekleştirilir. l^w damgalı ortalama değeri, damga eklemedeki ortalama değer l ile aynı değerdedir. Fark değerine eklenen bit,

$$b = \text{LSB}(h^w) \quad (2.15)$$



Şekil 2.6. Histogram değiştirmeye dayalı damga çıkartma algoritmasının genel gösterimi

ile belirlenir. LSB, en düşük anlamlı biti temsil etmektedir. Ters tamsayı dönüşümü kullanılarak orijinal piksel değerleri hesaplanır.

Yönteminin anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak için aşağıda bir örnek verilmiştir. Bir görüntüde komşu iki pikselin parlaklık değerleri $x = 206$, $y = 201$ olsun. $b = 1$ biti eklenip tersinir damgalama işlemi yapılacaktır. İlk önce x ve y 'nin ortalama değeri l ve fark değeri h hesaplanır:

$$l = \left\lfloor \frac{206 + 201}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{407}{2} \right\rfloor = 203, \quad h = 206 - 201 = 5$$

Fark değeri h 'nin ikili tabandaki gösterimi $h = 5 = (101)_2$ şeklindedir. Damgalanacak bit $b = 1$ (ya da 0), fark değerinin en düşük anlamlı biti olacak şekilde h değerine eklenir. Yeni fark değeri $h^w = (101b)_2 = (1011)_2 = 11$ olmaktadır. Görüleceği üzere, fark değeri 5'ten 11'e kadar genişletilmiş olur. Matematiksel olarak bu eşitlik

$$h^w = 2 \times h + b = 2 \times 5 + 1 = 11$$

denklemleri ile ifade edilir. Son olarak x ve y 'nin damgalanmış yeni değerleri x^w ve y^w ;

$$x^w = 203 + \left\lfloor \frac{11 + 1}{2} \right\rfloor = 209, \quad y^w = 203 - \frac{11}{2} = 198$$

olarak hesaplanır. Başlangıçta 206 ve 201 olan komşu piksel parlaklık değerleri, damgalama işlemi sonucunda 209 ve 198 olarak değişmiştir.

Damga çıkartım algoritması için, (x^w, y^w) piksel çiftinin tamsayı ortalama değeri ve farkı hesaplanır:

$$l^w = \left\lfloor \frac{209 + 198}{2} \right\rfloor = 203, \quad h^w = 209 - 198 = 11$$

Fark değeri h^w ikili tabanda $h^w = 11 = (1011)_2$ şeklinde temsil edilir. En düşük anlamlı bit damga, en düşük anlamlı bit hariç diğer bitler orijinal fark değerini verir. Matematiksel olarak bu işlemler

$$b = \text{LSB}(h^w) = 1, \quad h = \left\lfloor \frac{h^w}{2} \right\rfloor = 5$$

eşitlikleriyle ifade edilir. Bu basit örnekte, damgalanmış görüntüdeki parlaklık seviyelerinin 255'den büyük olmayacağı varsayılmıştır. x ve y değerlerinin 250 ve 203 olduğu farz edilsin. Tian'ın yöntemi ait görsel kalite ve damga miktarı Lena görüntüsü için Şekil 2.7'de verilmiştir

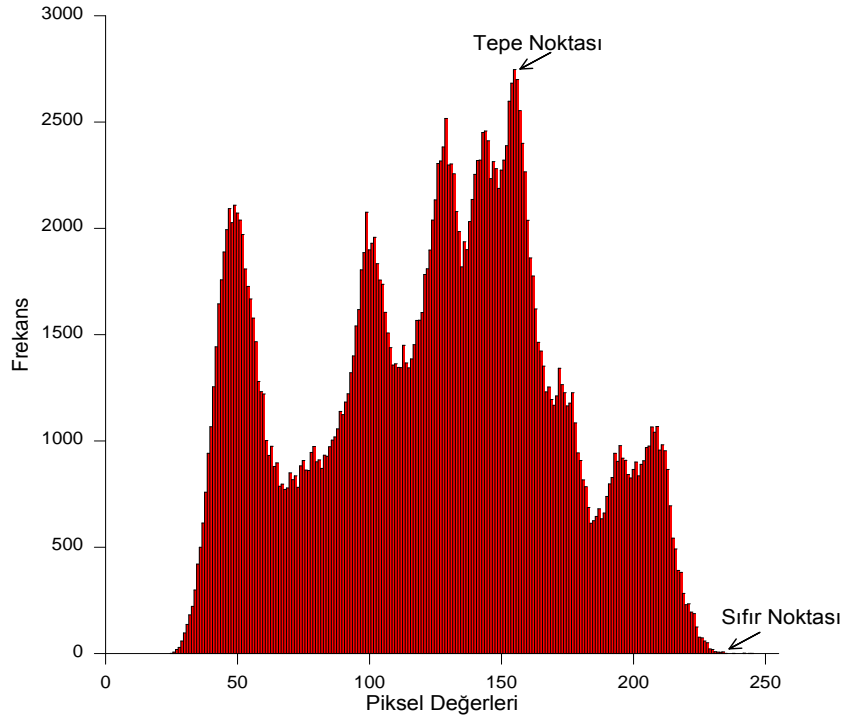


Şekil 2.7. (a)'da 512×512 boyutlarındaki gri seviyeli orijinal Lena görüntüsü (b)'de 101089 bit eklenmiş (0.39 bpp – 44.20 dB), (c)'de 222042 bit eklenmiş (0.85 bpp – 32.54 dB), (d)'de 516794 bit eklenmiş (1.97 bpp – 16.75 dB).

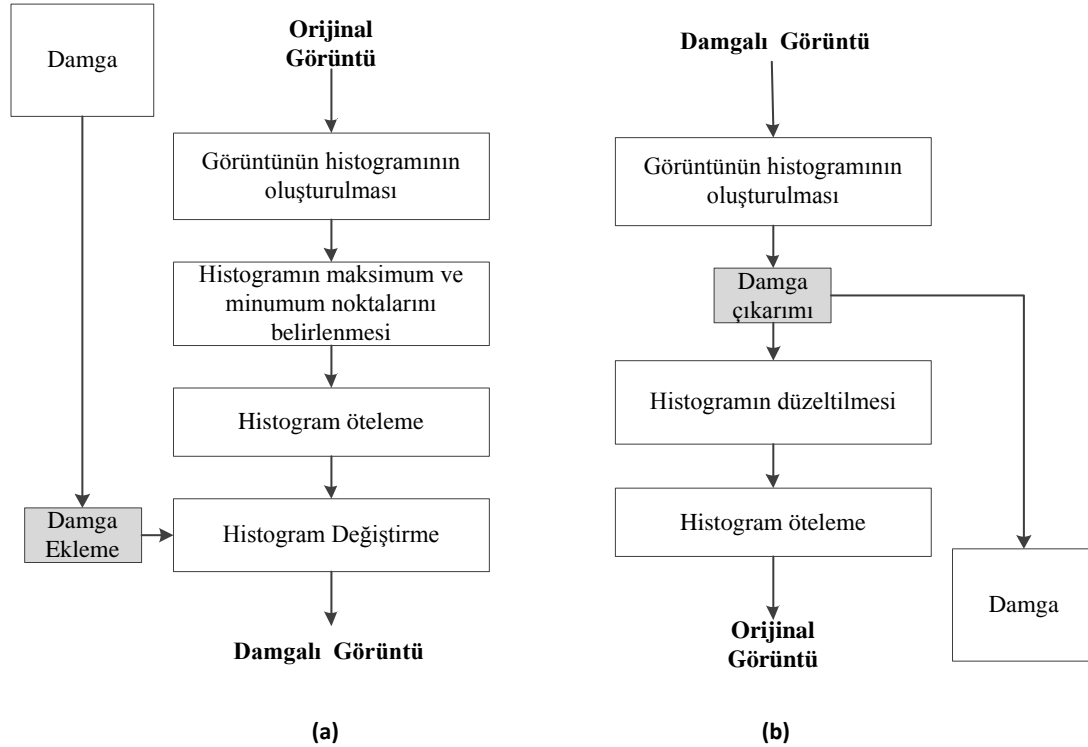
FG yöntemi birçok çalışmada geliştirilmiştir. Alattar, FG yöntemini ikiden fazla komşu piksele genişletip komşu pikseller arasındaki ilintiden daha fazla yararlanmıştır [17]. Kim ve diğerleri, konum haritasının boyutunu azaltmak için bir yaklaşım sunmuşlardır [18]. Daha sonra, Lin ve diğerleri, konum haritasının tamamen kaldırarak başka bir FG yöntemi sunmuşlardır [19]. Hu ve diğerleri, FG yöntemini komşu piksel farkı yerine öngörü hatasına uygulamış ve konum haritası için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır [20]. Son olarak, yakın zamanda da Luo ve diğerleri, aradeğerleme hatasına FG uygulayarak görüntülerin düşük çözünürlükleri yardımıyla yüksek kapasiteli ve düşük bozunumlu bir tersinir görüntü damgalama yöntemi geliştirmiştir [21].

2.3.3. HD yöntemine dayalı TGD

HD yöntemi, Ni ve diğerleri tarafından ortaya atılan ve görüntünün histogramından yararlanarak az hesap yüklü, yüksek kapasiteli ve düşük bozunumlu damgalama gerçekleştiren bir tersinir damgalama yöntemidir [22]. HD, görüntü histogramındaki tepe ve sıfır noktaları kullanır. Örneğin Lena görüntüsüne ait histogram ve histogramın tepe ve sıfır noktaları Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Yöntemin arkasındaki temel fikir, görüntü histogramındaki tepe noktası kadar boşluk oluşturmak ve bu boşluklara damga bitleri ekleyerek damgalanmış görüntü oluşturmaktır. Şekil 2.8'deki histogramda tepe noktası 2580 olduğundan görüntüye eklenebilecek bilgi miktarı 2580 bittir. Damga çözücünün, damgalanmış görüntüden orijinal görüntüyü tekrar geri elde edebilmesi için histogramın tepe ve sıfır noktalarının da damga çözücüye yan bilgi olarak iletilmesi gerekmektedir.



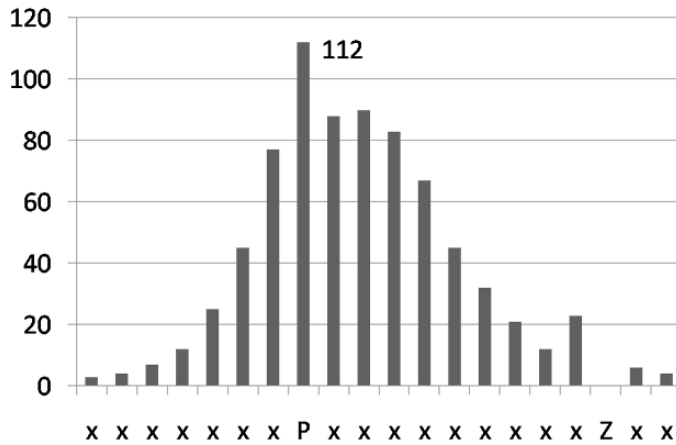
Şekil 2.8. Lena görüntüsüne ait histogram



Şekil 2.9. HD'ye karşılık gelen blok diyagram (a) damga ekleme (b) damga çıkartımı

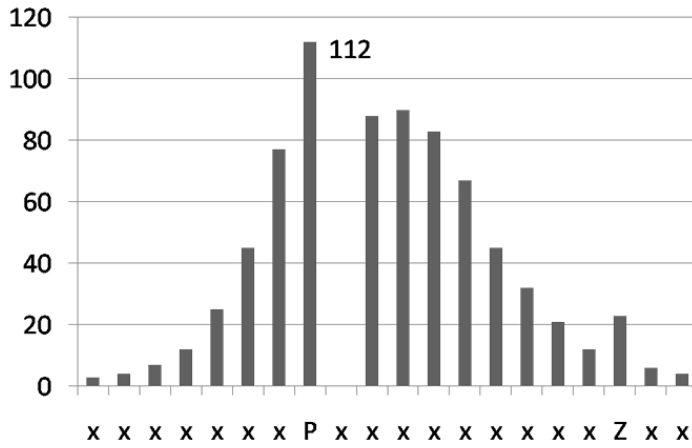
HD yöntemine karşılık gelen blok diyagram Şekil 2.9(a) ve Şekil 2.9(b) gösterilmiştir. Yöntem, aşağıda siyah beyaz bir görüntü için tanıtılmıştır. Renkli görüntüler için genelleme yapmak kolaydır. Aşağıda verilen işlemler uygulanarak damgalı görüntü elde edilir:

1. Görüntünün histogramı hesaplanır. Histogram üzerinde bir tepe noktası ve buna karşılık gelen bir sıfır noktası bulunur. Tepe noktası, görüntüde en fazla karşılaşılan parlaklık değerine, sıfır noktası ise hiç karşılaşılmayan veya en az karşılaşılan parlaklık değerine karşılık gelir. Şekil 2.10'da, damgalanacak görüntünün histogramında tepe ve sıfır noktaları sırasıyla P ve Z harfleriyle gösterilmiştir. Tepe noktasının ekleme işlemi için kullanılması ile maksimum kapasiteye ulaşmak hedeflenir. Tepe noktası eklenebilecek maksimum bit sayısını (kapasiteyi) belirler.



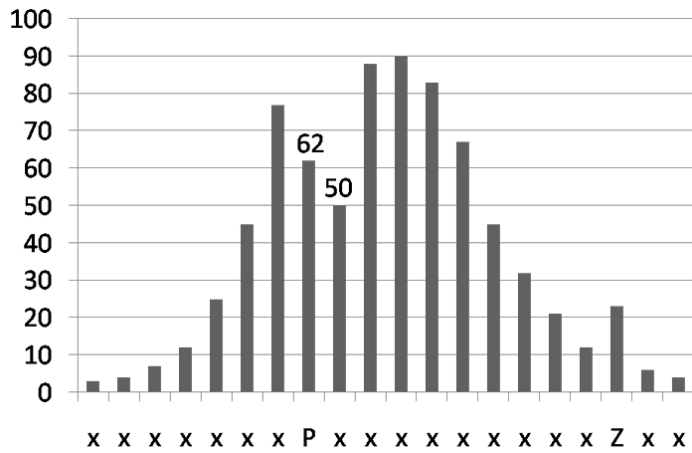
Şekil 2.10. Orjinal görüntünün histogramı.

2. Sıfır noktasının tepe noktasından büyük olduğu varsayalım. Örneğin tepe noktası $P=128$, sıfır noktası $Z=207$ olsun. Bu noktalar görüntü histogramından elde edildikten sonra, görüntüdeki tüm pikseller belli bir ardışıl sıra ile (örneğin soldan sağa ve yukarıdan aşağıya) taranır. Tepe ve sıfır noktaları arasındaki piksel değerleri '1' arttırılarak histogram (tepe noktası, sıfır noktası aralığında) bir birim sağa kaydırılır. Şekil 1'deki histogram için, (128,207) aralığındaki piksellerin değeri '1' arttırılmış olur. Bu işlem sonucunda histogram üzerinde tepe noktasının bir fazlası yani 129 değeri boşaltılmış olur. Ayrıca, sıfır noktasının bir eksiği yani 206 değerindeki pikseller ise sıfır noktasına taşınmış olur. Şekil 2.11'de kaydırılmış histogram gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Kaydırılmış histogram

3. Tüm piksel değerleri yeniden aynı ardışıl sırada taranır. Bir tepe noktası ile karşılaşıldığında eklenecek bit değerine bakılır; eğer '1' eklenecekse tepe noktasının değeri bir arttırılır. Aksi halde, tepe noktasının değeri değiştirilmez. Şekil 2.12'de damgalanmış bir görüntünün histogramı gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Damgalanmış görüntünün histogramı

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

Aşağıda verilen adımlar uygulanarak orijinal görüntü geri elde edilir ve damga çıkartılır. Orijinal görüntü histogramında tepe noktası 128, sıfır noktası ise 207 olduğu varsayalım:

1. Damgalanmış görüntü, ekleme algoritmasında kullanılan ardışıl tarama ile taranır. Değeri tepe noktası+1 olan bir piksel değeri ile karşılaşıldığında bu pikselden '1' bilgisi damga olarak çıkartılır. Eğer karşılaşılan piksel değeri tepe noktasına karşılık gelirse bu durumda '0' bilgisi damga olarak çıkartılır. Yani damgalanmış görüntüde 129 değeri '1' damga bitini 128 değeri ise '0' damga bitini temsil eder.

2. Damga bilgisi çıkartıldıktan sonra, görüntü yine aynı ardışıl tarama ile taranır. Tepe noktası (hariç) ile sıfır noktası (dahil) arasında bir piksel değeri ile karşılaşıldığında bu pikselin değeri 1 azaltılarak damga ekleme adımında yapılan histogram kaydırma işleminin tersi gerçekleştirilir. Yani histogramda (128,207] aralığı bir birim sola kaydırılmış olur.

FG yönteminde olduğu gibi, HD yönteminin zayıf yönlerini gidermek amacıyla çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Hwang ve diğerleri HD histogramdaki maksimum ve minimum noktalar yerine konum haritası oluşturmayı önermiştir. Bu şekilde damgalı görüntü haricinde damgayı çözmek için bir ek bilgiye ihtiyaç kalmamıştır [23]. Lin ve Hsueh üç piksel blok farklarının histogramına HD algoritmasını uygulamıştır [24]. Tsai ve diğerleri orijinal görüntüyü $n \times n$ piksel boyutunda bloklara ayırmışlar ve bir bloğun merkezindeki piksel ile bloktaki diğer piksellerin farkını hesaplanmışlardır [25]. Damgayı fark değerine eklemişlerdir. Kim ve diğerleri alt örneklenmiş görüntüler arasındaki uzamsal ilintiye dayalı bir HD yöntemi tasarlamıştır [26].

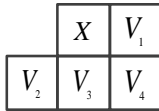
2.3.4. ÖHG yöntemine dayalı TGD yöntemleri

ÖHG yöntemine dayalı ilk TGD yöntemi Thodi ve Rodrigez tarafından sunulmuştur [9]. Yöntemde FG ve HD'nin üstünlükleri birleştirilerek FG ve HD'ye göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Yöntem aşağıda özetlenmiştir.

İlk önce, uygun bir öngörü yöntemiyle görüntünün öngörüsü oluşturulur. Literatürde görüntüler için çeşitli öngörü algoritmaları sunulmuştur [15,27]. Thodi ve Rodrigez, çalışmalarında Denklem (2.11) ile verilen ortalama kenar tahminini kullanmışlardır [28]. x pikselinin \hat{x} ile belirtilen öngörüsü

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

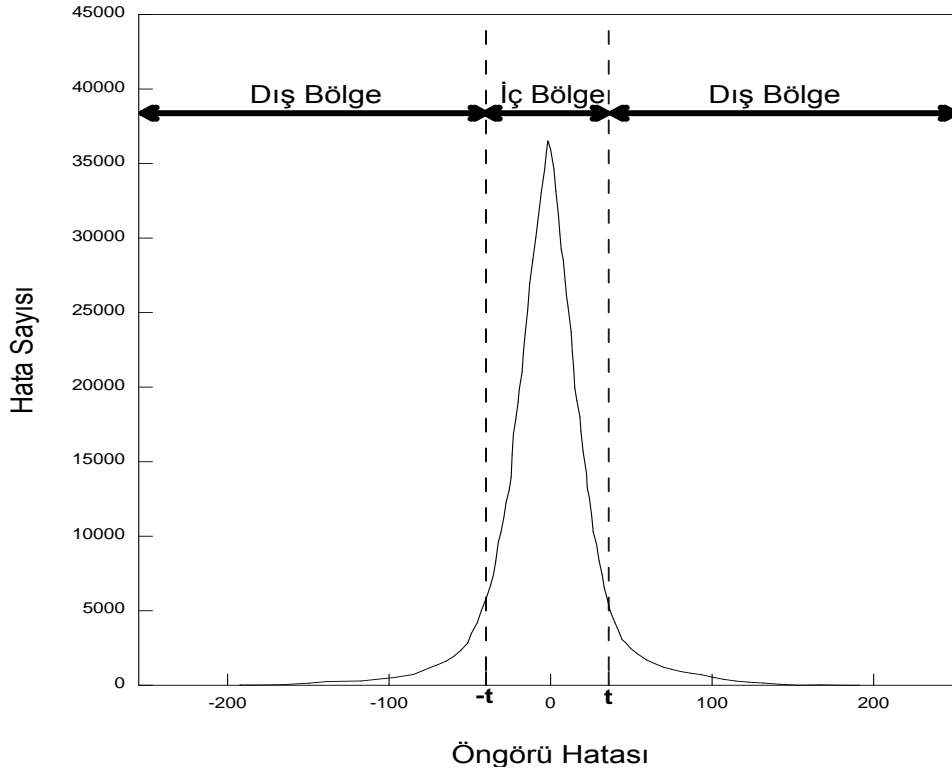
eşitliğinden hesaplanır. Denklem (2.11)'in hesaplanmasında kullanılan pikseller Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Bir pikselin öngörüsünün hesaplanmasında kullanılan pikseller

Daha sonra öngörü hatası $e = x - \hat{x}$ eşitliğinden belirlenir. Hata tüm pikseller için hesaplanarak öngörü hatası görüntüsü (ÖHG) oluşturulur. ÖHG'nin histogramı çıkartılır. ÖHG histogramı genelde Şekil 2.14'deki gibi olmaktadır. Bir eşik kullanılarak histogram iki bölgeye ayrılır. t eşik değer olmak üzere, $e \in [-t, t)$ ise e iç bölgede, aksi halde dış bölgededir. Dış bölgede kalan pikseller ötelenen, iç bölgede kalan piksellerin damgalanabilmesi için boşluklar oluşturulabilmesine imkân vermektedir. Çerçeveye eklenebilecek maksimum bilgi miktarını, iç bölgedeki piksel sayısı veya eşik değeri t belirlemektedir. Bu nedenle t 'ye kapasite parametresi denmektedir.

Orijinal görüntünün pikselleri belirli bir sırada (örneğin soldan sağa ve yukarıdan aşağıya) taranıp aşağıda verilen adımlar uygulanarak damgalı görüntü elde edilir. İfadelerde t kapasite parametresini, $b \in \{0,1\}$ eklenecek damga bitini, e^w damgalı öngörü hatası pikselini ve x^w damgalanmış piksel değerini belirtmektedir.



Şekil 2.14. ÖHG histogramının genel şekli (hesaplamalar lena görüntüsü için yapılmıştır).

a. $e \in [-t, t)$ ise, öngörü hatası

$$e^w = 2e + b \quad (2.17)$$

eşitliği kullanılarak genişletilir. Daha sonra, damgalı piksel değeri

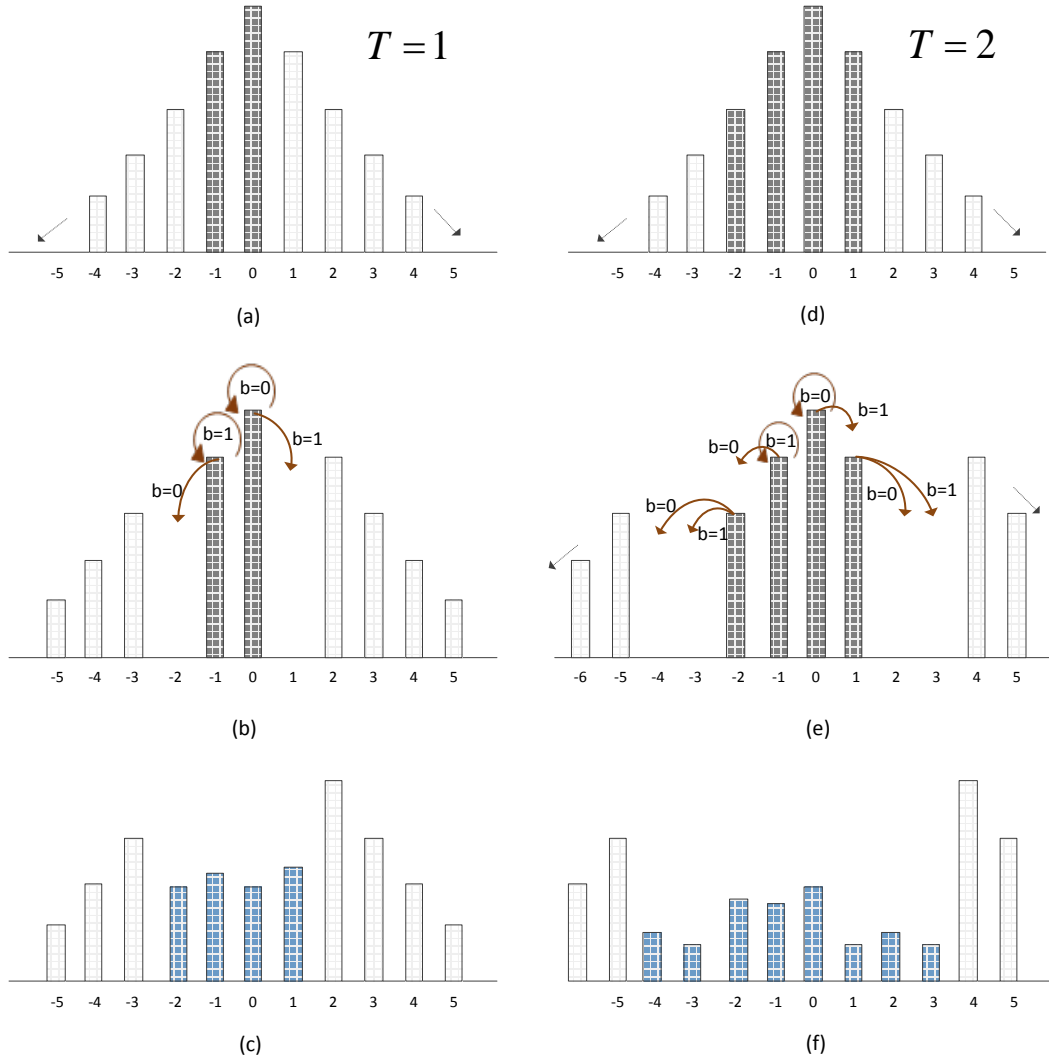
$$x^w = \hat{x} + e^w \quad (2.18)$$

ifadesinden elde edilir.

b. $e \notin [-t, t)$ ise, damgalı piksel değeri,

$$x^w = \begin{cases} x + t, & e \geq t \\ x - t, & e < -t \end{cases} \quad (2.19)$$

eşitliğinden hesaplanır.



Şekil 2.15. (a) Öngörü hatası histogramında $t=1$ olması durumunda seçilen hatalar koyu olan bloklardır. (b) Histogram ötelemeyi göstermekte (c) Damgalı öngörü hatasının histogramıdır. (d) Öngörü hatası histogramında $t=2$ olması durumunda seçilen hatalar koyu olan bloklardır. (e) Histogram ötelemeyi göstermekte (f) Damgalı öngörü hatasının histogramıdır.

Yukarıda verilen işlemler $t = 1$ ve $t = 2$ durumları için Şekil 2.15’de verilmiştir. Örneğin $t = 1$ iken olduğunda öngörü hatası -1 ve 0 olan piksellere 1 bit eklenmiş, diğer öngörü hataları ise boşluk oluşturmak amacı ile 1 birim ötelenmiştir. Benzer şekilde kapasite parametresi $t = 2$ olduğunda ise öngörü hatası $-2, -1, 0, 1$ olan piksellere 1 bit eklenmiş, diğer öngörü hataları 2 birim ötelenmiştir.

Damga eklemenin tersinir olabilmesi için, damga eklemede hesaplanan öngörü hatasının aynısı damgalanmış görüntüden belirlenmelidir. Aşağıda verilen adımlar uygulanarak eklenen bit ve orijinal piksel değeri geri elde edilir.

a. Damgalı hata

$$e^w = x^w - \hat{x} \quad (2.20)$$

ilişkisinden elde edilir.

b. $e^w \in [-2t, 2t)$ ise, eklenen bit

$$b = e^w - 2 \left\lfloor \frac{e^w}{2} \right\rfloor \quad (2.21)$$

ilişkisinden, daha sonra da orijinal piksel değeri,

$$x = x^w - 2 \left\lfloor \frac{e^w}{2} \right\rfloor - b \quad (2.22)$$

ifadesinden bulunur.

c. $e \notin [-2t, 2t)$ ise, piksele eklenen bit yoktur ve orijinal piksel değeri

$$x = \begin{cases} x^w - t, & e^w \geq 2t \\ x^w + t, & e^w < -2t \end{cases} \quad (2.23)$$

denklemden belirlenir.

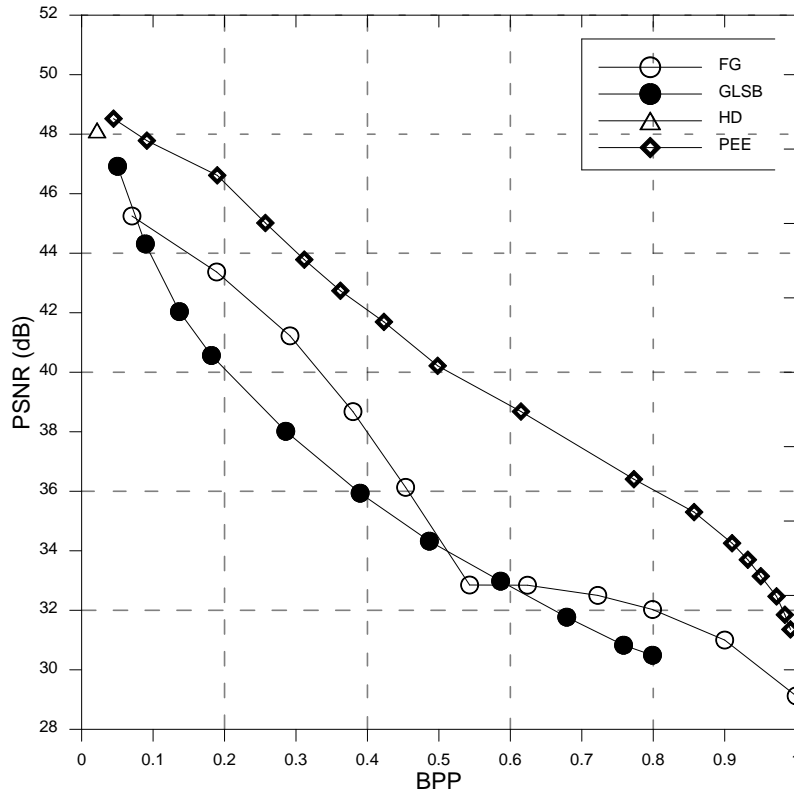
Thodi ve Rodrigez'in geliştirdiği yöntem birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiştir. Tai ve ark. komşu iki piksel arasındaki mutlak farkların histogramına genişletme uygulayarak yüksek kapasitelere ulaşmışlardır [29]. Hong, ikili ağaç yapısını damga eklemede kullanarak Tai ve ark. ait yöntemin kapasitesini daha da iyileştirmiştir [30]. Hong, ayrıca öngörü hatasının enerjisine dayalı bir yöntem geliştirmiştir. Yöntemde az enerjiye sahip öngörü hataları damga eklemek için kullanılmış, yüksek enerjiye sahip öngörü hataları damga eklemede kullanılmayarak damgalı görüntüde oluşan bozunum azaltılmıştır. Son zamanlarda Li ve ark. tarafından etkili TGD yöntemleri geliştirilmiştir [10,31]. İlk çalışmada görüntü pikselleri öngörü hatalarına göre düzgün ve düzgün olmayan iki kümeye

ayrılmaktadır [10]. Ardından düzgün bölgedeki bazı piksellere 2 bit, kötü bölgedeki bazı piksellere 1 bit eklenerek uyarlanır damgalama yapılmaktadır. Diğer bir deyişle yüksek ve düşük öngörü hatasına sahip pikseller farklı şekillerde damgalanmaktadır. Ayrıca genişleyebilen piksellerden sadece bazıları damgalanıp ötelenen piksel sayısı azaltılarak görüntü kalitesi iyileştirilmektedir. İkinci çalışmalarında öngörü hataları arasındaki ilintiden yararlanan bir yöntem sunulmuştur [31]. Yöntemde ÖHG'nin 2-boyutlu histogramına uyarlamalı TD uygulanır. Yöntem, özellikle düşük kapasite değerlerinde yüksek görsel kalite vermektedir. Bu çalışmalara ek olarak Coltuc görüntüdeki görsel bozunumu azaltan etkin bir yöntem sunmuştur. Yöntemde eklenecek bir bit sadece işlem yapılan piksele eklenmemiş aynı zamanda pikselin tahmini için kullanılan piksellere dağıtılmıştır [32].

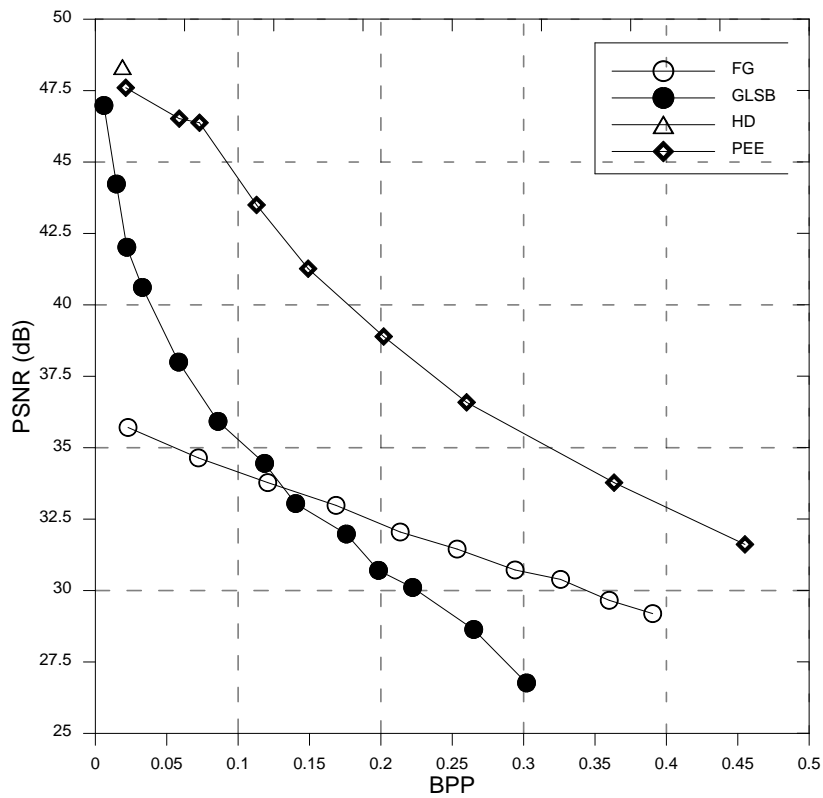
Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'de, yukarıda özeti verilen 4 yöntemin performansına ait sonuçlar Lena ve Baboon test görüntüleri için verilmiştir.

2.4. TVD Algoritmaları

TGD yöntemleri görüntüdeki uzamsal ilintiden faydalanmaktadır. Sayısal videoda hem uzamsal hem de zamansal ilinti mevcuttur. Dolayısıyla, bir TGD yöntemi video çerçevelerine tek tek uygulandığında zamansal ilinti dikkate alınmadığından etkili sonuç elde edilemez. Damgalamadan önce çerçeveler arasındaki zamansal ilintinin giderilmesinin damgalamanın başarımını arttırması beklenir. Çerçeveler arasındaki ilinti genelde hareketten kaynaklandığından, hareket dengelenmiş öngörü (HDÖ) veya hareket dengelenmiş ara değerlendirme (HDA) kullanılarak çerçeveler arasındaki zamansal ilintiyi gidermek mümkündür. HDÖ'yü temel alan sınırlı sayıda tersinir video damgalama (TVD) çalışmaları mevcuttur [33,34]. Bu kısımda ilk önce, açıklanacak yöntemlere altyapı oluşturmak amacıyla videoda çerçeve öngörüsünün oluşturulması tartışılacak ve daha sonra karşılaştırma amaçlı kullanılan yöntemler kısaca açıklanacaktır [33,34].



Şekil 2.16. TGD yöntemlerinin Lena görüntüsüne ait performansı



Şekil 2.17. TGD yöntemlerinin Baboon görüntüsüne ait performansı

2.4.1. Videoda çerçeve öngörüsünün hesaplanması

Bu tezde, hesap yükü göz önünde bulundurularak blok tabanlı hareket dengelenmiş çerçeve öngörüsü (HDÇÖ) tercih edilmiştir [35].

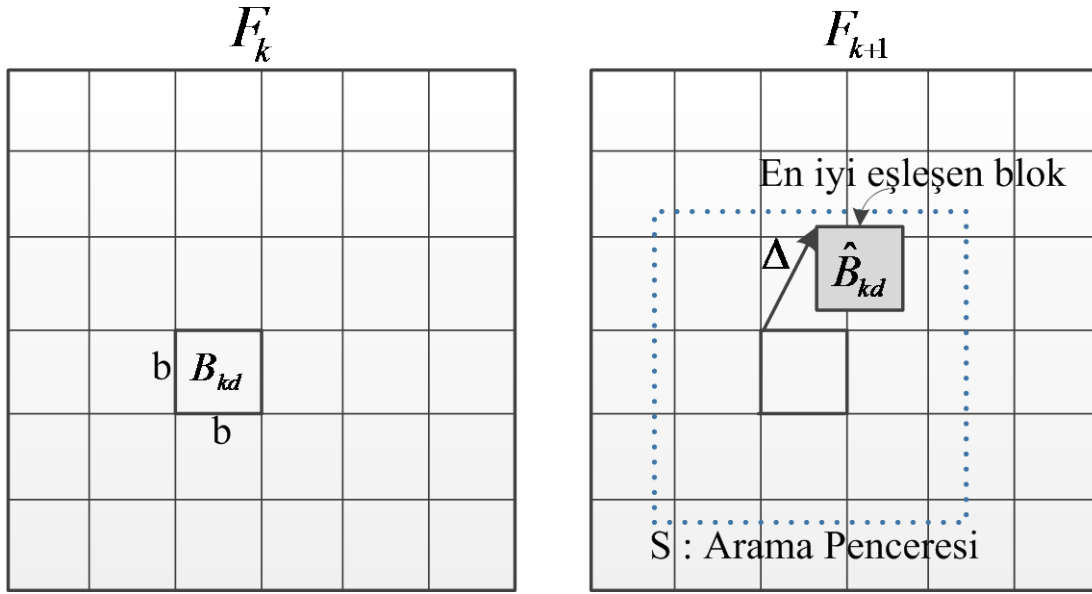
Videonun n çerçeveden oluştuğunu varsayalım ve k . sırada $1 \leq k \leq n$ olan bir çerçevenin (i, j) konumundaki pikselinin parlaklık seviyesi $F_k(i, j)$ ile belirtilsin. Piksel cinsinden çerçeve boy ve eni M ve N olmak üzere k . çerçeve $F_k = \{F_k(i, j): 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$ şeklinde gösterilebilir. Video, tüm çerçeveler topluluğu olup, $V = \{F_k: 1 \leq k \leq n\}$ kümesidir.

Bir video çerçevesi F_k , Şekil 2.18'de görüldüğü gibi $b \times b$ boyutunda örtüşmeyen bloklara ayrılır ve çerçeve şeklinde $F_k = \{B_{kd} | \forall d \in \{1, 2, \dots, m\}\}$ blok topluluğu olarak ifade edilebilir. Burada d çerçeve içinde bloğun kaçınıcı blok olduğunu, m ise çerçevedeki toplam blok sayısını göstermektedir. B_{kd} bloğunun \hat{B}_{kd} ile gösterilen öngörüsü, blok eşleşme algoritması (BEA) kullanılarak Şekil 2.18'de gösterildiği gibi, referans çerçeve olarak adlandırılan F_{k+1} 'de tespit edilir. \hat{B}_{kd}

$$\hat{B}_{kd}(i, j) = F_{k+1}\{i + \Delta_x, j + \Delta_y\} \quad (2.24)$$

ile verilir. Burada Δ_x ve Δ_y , B_{kd} bloğuna ait hareket vektörünün yatay ve düşey bileşenleridir. Bu işlem çerçevedeki tüm bloklar için tekrarlanarak çerçevenin öngörüsü \hat{F}_k aşağıdaki şekilde oluşturulur.

$$\hat{F}_k = \{\hat{B}_{kd} | \forall d \in \{1, 2, \dots, m\}\} \quad (2.25)$$



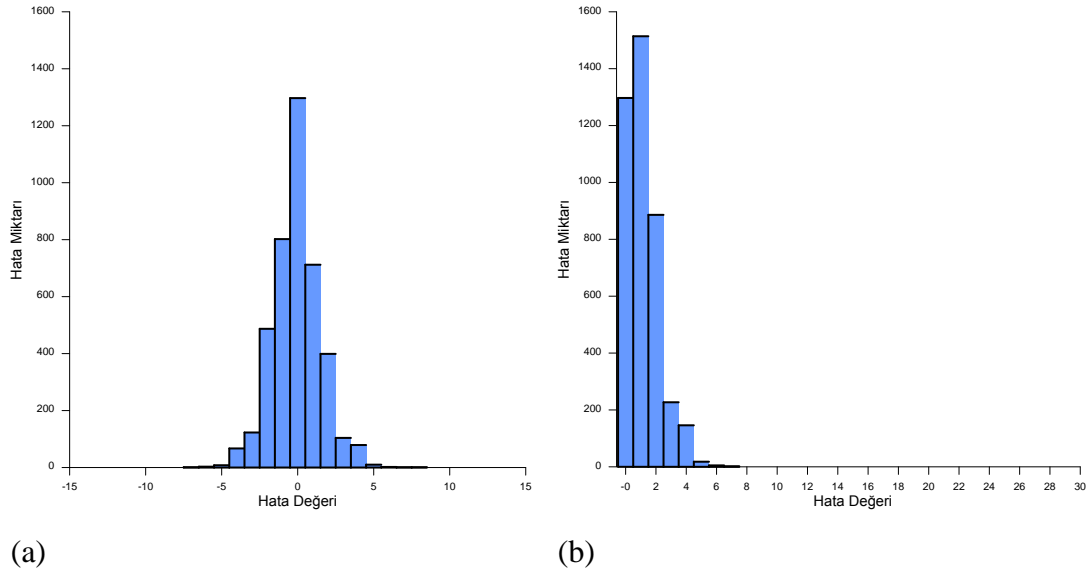
Şekil 2.18. BHK'ya ait bir blok ve en iyi eşleşen bloğun gösterimi

2.4.2. Chung ve diğerlerinin TVD yöntemi

Yöntemde, orijinal çerçeveler bloklara ayrılır [34]. Ardından her bir bloğa ilişkin

$$D_{kd}(i, j) = B_{kd}(i, j) - \hat{B}_{kd}(i, j) \quad i, j \in \{1, 2, \dots, b\} \quad (2.26)$$

ile verilen hareket dengelenmiş öngörü hatası (HDÖH) belirlenir. Bir bloğa ait HDÖH histogramı Şekil 2.19(a)'da gösterildiği gibi Laplace dağılımına sahiptir. HDÖH hatasının mutlak değeri $MD_{kd}(i, j)$ ile belirtilsin. Her bir bloğa ait HDÖH hatasının mutlak değeri alınarak hareket dengelenmiş mutlak öngörü hatası (HDMÖH) oluşturulur. HDMÖH MD_{kd} ile belirtilsin. ($MD_{kd}(i, j) = |B_{kd}(i, j) - \hat{B}_{kd}(i, j)|$). HDMÖH'ye karşılık gelen histogram Şekil 2.19(b)'de gösterilmiştir. Mutlak değer alınmasının nedeni damgalama kapasitesini arttırmaktadır. Örneğin Şekil 2.19(a)'da verildiği gibi mutlak değer alınmadan önce histogramın tepe noktasına (0 öngörü hatasına) sahip piksel sayısı 1297 iken, mutlak değer alınmasından sonra bu değer 1514 değerine yükselmiştir.



Şekil 2.19. (a) Fark bloğu histogramı (b) Mutlak fark bloğu histogramı

Verilen bir video dizisi için damga ekleme 4 adımdan oluşup, detaylar aşağıda verilmiştir.

1. Damgalama adımına ilk çerçeveden başlanır. $k = 1$
2. F_k , $b \times b$ boyutunda örtüşmeyen bloklara bölünür. B_{kd} bloğunun öngörüsü \hat{B}_{kd} elde edilir ve karşılık gelen HDMÖH MD_{kd} hesaplanır.
3. Denklem (2.27) kullanılarak $MD_{kd}^w(i, j)$ ile belirtilen damgalanmış HDMÖH elde edilir.

$$MD_{kd}^w(i, j) = \begin{cases} MD_{kd}(i, j) + b, & MD_{kd}(i, j) = P_{kd} \\ MD_{kd}(i, j) + 1, & MD_{kd}(i, j) > P_{kd} \\ MD_{kd}(i, j) & , \text{ Aksi Halde} \end{cases} \quad (2.27)$$

Denklem (2.23)'de $b \in \{0,1\}$ damga bitini, P_{kd} ise k . çerçevede d . bloğa ait HDMÖH histogramının tepe noktasını göstermektedir.

4. Denklem (2.21) uygulanarak, damgalı blok B_{kd}^w belirlenir.

$$B_{kd}^w(i, j) = \begin{cases} B_{kd}(i, j) + MD_{kd}^w(i, j), & B_{kd}(i, j) \geq \hat{B}_{kd}(i, j) \\ B_{kd}(i, j) - MD_{kd}^w(i, j), & \text{Aksi Halde} \end{cases} \quad (2.28)$$

5. Çerçeveadaki tüm bloklar için yukarıda verilen işlemler uygulanarak damgalı çerçeve F_k^w elde edilir.

Son çerçeve (F_n) durumunda BEA için referans çerçeve sondan bir önceki çerçeve (F_{n-1}) olduğuna dikkat ediniz. Yukarıda açıklanan işlemler tüm çerçevelere uygulanarak damgalı video elde edilir. Yöntemin kapasitesi, çoklu seviye damgalama ile arttırılabilir. Örneğin, damgalı videonun orijinal video gibi kabul edilip yukarıda verilen işlemin bir kez daha uygulanması 2 seviyeli damgalamadır. Gerekli kapasiteye ulaşmak için seviye sayısı arttırılabilir. Çok seviyeli damgalama, çerçevelerde taşmaya neden olan piksel sayısında artışına neden olduğundan kapasitedeki artış seviye sayısındaki artışla orantılı değildir. Damgayı geri elde etmek için, hareket vektörlerine, çerçevelere ait histogramların tepe ve sıfır noktalarına ve taşma konumlarını belirlemek üzere bir sınır haritasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yöntemin performansına ait sonuçlar Bölüm 3 ve Bölüm 4'te verilmiştir.

2.4.3. Zeng ve diğerlerine ait TVD

Zeng ve diğerleri tarafından önerilen yöntem, Kısım 2.4.2'deki çalışmadan farklı olarak, çerçeve tabanlı bir TVD yöntemidir [33]. HDÖH görüntüsü histogramında iki tepe noktası belirlenip HD yöntemi ile HDÖH görüntüsü damgalanır. Ardından damgalı HDÖH görüntüsü, öngörü çerçevesi ile toplanarak damgalı çerçeve elde edilir. Yöntemin damga ekleme adımları aşağıda verilmiştir:

1. Damgalama adımına ilk çerçeveden başlanır ($k = 1$).
2. F_k , $b \times b$ boyutunda örtüşmeyen bloklara bölünür. B_{kd} bloğunun öngörüsü \hat{B}_{kd} elde edilir. Tüm bloklar için öngörüler hesaplanarak öngörü çerçevesi \hat{F}_k oluşturulur.

3. HDÖH çerçevesi $D_k = F_k - \hat{F}_k$ 'dan belirlenir. HDÖH çerçevesi histogramı $hist(D_k)$ hesaplanır.

4. $hist(D_k)$ kümesindeki en yüksek iki tepe noktası LM ve RM belirlenir. Çoğunlukla tepe noktaları $\{-1,0\}$ yada $\{0,1\}$ dir. $LM < RM$ varsayımı ile histogramda LM 'nin solunda kalan LZ ile belirtilen en düşük nokta ve RM 'nin sağındaki RZ ile belirtilen en düşük nokta belirlenir.

5. Damga bitleri için boşluklar oluşturmak amacıyla Denklem (2.29) kullanılarak F_k 'ya ait HDÖH görüntüsü histogramına öteleme işlemi uygulanır.

$$D_k^w(i, j) = \begin{cases} D_k(i, j) - 1, & D_k(i, j) \in (LZ, LM) \\ D_k(i, j) + 1, & D_k(i, j) \in (RM, RZ) \end{cases} \quad (2.29)$$

6. F_k , bir kez daha taranır ve Denklem (2.30) kullanılarak damgalı hata çerçevesi D_k^w oluşturulur.

$$D_k^w(i, j) = \begin{cases} D_k(i, j) - b, & D_k(i, j) = LM \\ D_k(i, j) + b, & D_k(i, j) = RM \end{cases} \quad (2.30)$$

7. D_k^w ile \hat{F}_k toplanarak damgalı çerçeve elde edilir:

$$F_k^w(i, j) = \hat{F}_k(i, j) + D_k^w(i, j) \quad (2.31)$$

Adımlar son çerçeveye gelinceye kadar diğer çerçeveler için tekrarlanır.

Bir önceki yöntemde olduğu gibi, son çerçeve durumunda BEA için referans çerçeve sondan bir önceki çerçevedir ve yöntemin kapasitesi çoklu seviye damgalama ile artırılabilir. Yöntemde damga çıkarmada kullanılmak üzere taşma konumlarını tutmak için bir sınır haritası kullanılmıştır. Ayrıca hareket vektörleri her çerçeveye bir yan bilgi olarak damga ile birlikte eklenmiştir. Diğer taraftan damganın çözümlenmesi için her çerçevenin LM , RM , LZ , RZ parametreleri çerçevelere yine

yan bilgi olarak eklenmesi gereklidir. Yöntemin performansı ile ilgili açıklamalar Bölüm 3 ve Bölüm 4'te verilmiştir.

BÖLÜM 3. HAREKET DENGELENMİŞ ARADEĞERLEME HATALARININ GENİŞLETİLMESİNE DAYALI TERSİNİR DAMGALAMA

3.1. Giriş

Bu bölümde, HDA tabanlı yeni bir TVD yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen yöntemde boşluk oluşturmak amacıyla mevcut TVD yöntemlerinden farklı olarak HDÖ hatası yerine hareket dengelenmiş çerçeve aradeğerleme (HDÇA) hatası kullanılmıştır. Bu sayede çerçeveler arasındaki ilintiden daha etkin bir şekilde faydalanılmıştır. Yöntem, düşük miktarda yan bilgiye ihtiyaç duyduğundan yüksek kapasiteye sahiptir. Önerilen yöntem, Kısım 2.3.4'te özetlenen çalışmanın sayısal videoya uyarlanmasıdır. Ancak, açıklanan çalışma video uyarlandığında iki problemle karşılaşmaktadır: (i) damga ekleme ile çıkartma esnasında aynı HDÇA hatasının kullanılmasının sağlanması, (ii) toplam kapasitenin çerçevelere dağıtılması karşılaşılmıştır. İki problemin çözümü için bu bölümde özgün fikirler geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin mevcut yöntemlere göre aşağıda belirtilen üstünlükleri vardır:

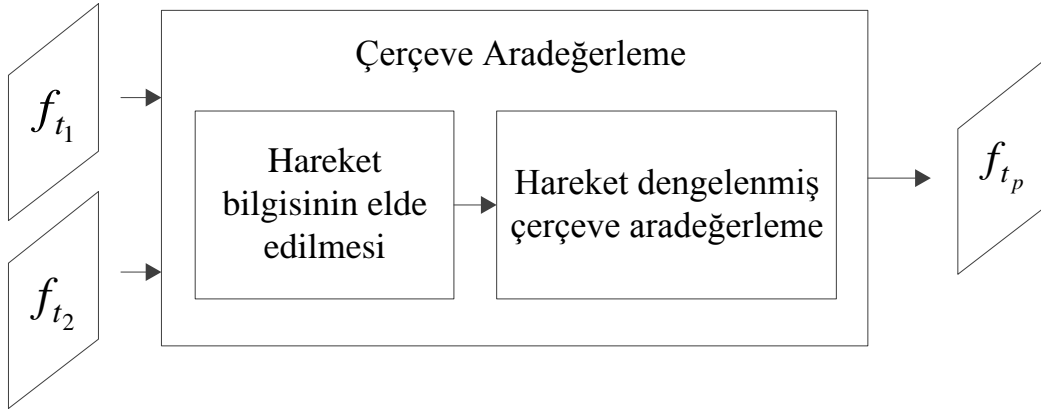
- a. HDÇA hatalarının genişletilmesinin HDÖ hatasının genişletilmesine göre çerçeveler arası ilintiyi daha fazla azalttığı bilgisayar simülasyonlarıyla gösterilmiştir.
- b. Önerilen TVD yöntemi, önceki yöntemlerin aksine HD tabanlı olmayıp, DE ile HD'nin birlikte kullanıldığı bir TVD yöntemidir. Dolayısıyla, daha iyi kapasite ve görsel kalite sağlanmaktadır.
- c. Orijinal video ve damga, herhangi bir yan bilgi iletilmeden damgalı videodan elde edilebilmektedir.

- d. Önerilen yöntemde, damgalı videoda damga çıkartma için gerekli bilgi miktarı oldukça azdır. HDÖ hatasına dayalı yöntemlerde, çerçeveler arası hareket vektörlerinin saklanması gerekmektedir. Ek bilgi miktarının fazla oluşu kapasitede önemli derecede azalmaya sebep olmaktadır. Önerilen yöntemde ise, hareket vektörlerinin bilinmesine gerek yoktur.

Bölüm aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. Bölüm altyapı oluşturmak amacıyla HDÇA Kısım 3.2’de tartışılmıştır. Thodi ve Rodrigez’e ait çalışmanın video uyarlanması karşılaşılan problemlerin çözümü için geliştirilen özgün fikirler ve önerilen yöntem Kısım 3.3’te açıklanmıştır. Önerilen yöntemin kapasite ve görsel kalite bakımından performansı bilgisayar simülasyonları aracılığıyla Kısım 3.4’te incelenmiş ve HDÖ hatasına dayalı yöntemlere göre üstün olduğu gösterilmiştir. Son olarak, önerilen yöntemin TVD araştırmasına yaptığı katkılar Kısım 3.5’te özetlenmiştir.

3.2. Hareket Dengelenmiş Çerçeve Aradeğerleme

Bazı uygulamalarda orijinal videonun çözünürlüğünün azaltılması gereklidir. Örneğin, video konferans uygulamasında haberleşme kanalının bant genişliği sınırlı olduğundan iletimden önce videonun çözünürlüğü azaltılır. Benzer şekilde, mobil cihazlar güç gereksinimlerinden ötürü düşük video çözünürlüklerine uygun olacak şekilde üretilmektedir. Video çözünürlüğünün azaltılması görsel video kalitesinde kötüleşmeye neden olmaktadır. Aradeğerleme kullanılarak video çözünürlüğü artırılabilir. Videoda uzamsal, zamansal ve uzamsal-zamansal olmak üzere üç tür çözünürlük vardır. Uzamsal çözünürlük uzamsal aradeğerleme (UA), zamansal çözünürlük zamansal aradeğerleme (ZA) ve uzamsal-zamansal çözünürlük uzamsal-zamansal aradeğerleme (UZA) ile artırılabilir. Bir videoda çerçeveler arasındaki fark, genelde hareketten kaynaklandığından aradeğerleme yapılmadan önce hareket etkisi giderilmelidir. Hareket etkisi giderilerek yapılan aradeğerlemeye hareket dengelenmiş aradeğerleme (HDA) denilmektedir.



Şekil 3.1. İki çerçeve durumunda HDÇA'ya karşılık gelen blok diyagram

Önerilen yöntem aradeğerleme hatasının genişletilmesine dayalıdır. Bu bölümde, aradeğerleme hatasının oluşturulması amacıyla hareket dengelenmiş zamansal aradeğerleme veya eşdeğer olarak hareket dengelenmiş çerçeve aradeğerleme (HDÇA) tercih edilmiştir. Aslında, video içeriğine göre uygun bir aradeğerleme kullanılmalıdır. Ancak, hangi aradeğerlemenin kullanıldığının belirtilmesi yan bilgi miktarında artışa sebep olup, kapasitenin düşmesine neden olacağından, kabul edilebilir bir görsel kalitede yüksek kapasite veren HDÇA tercih edilmiştir. HDÇA kendi başına bir araştırma konusu olup çözümü için çeşitli algoritmalar mevcuttur. Bu bölümde yeni bir HDÇA yöntemi geliştirilmemiş, mevcut yöntemlerden düşük hesap yüküne sahip ancak iyi video kalitesi veren bir çalışma kullanılmıştır.

HDÇA iki veya daha fazla çerçeve kullanılarak yapılabilir. İki çerçeve durumu için HDÇA'ya ilişkin blok diyagram Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu durumda amaç, $t_1 < t_p < t_2$ olmak üzere, t_1 ve t_2 anlarında f_{t_1} ve f_{t_2} ile belirtilen bilinen iki çerçeve arasında t_p anında f_{t_p} ile gösterilen bir çerçeve oluşturmaktır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi HDÇA iki adımdan oluşmaktadır. İlk adımda bilinen çerçeveler arasındaki hareket kestirilmektedir. İkinci adımda ise, kestirilen hareketten yararlanılarak bilinen çerçeveler arasına bir çerçeve sentezlenmektedir. Kullanılan HDÇA yönteminin detayları referans çalışmada bulunabilir [46].

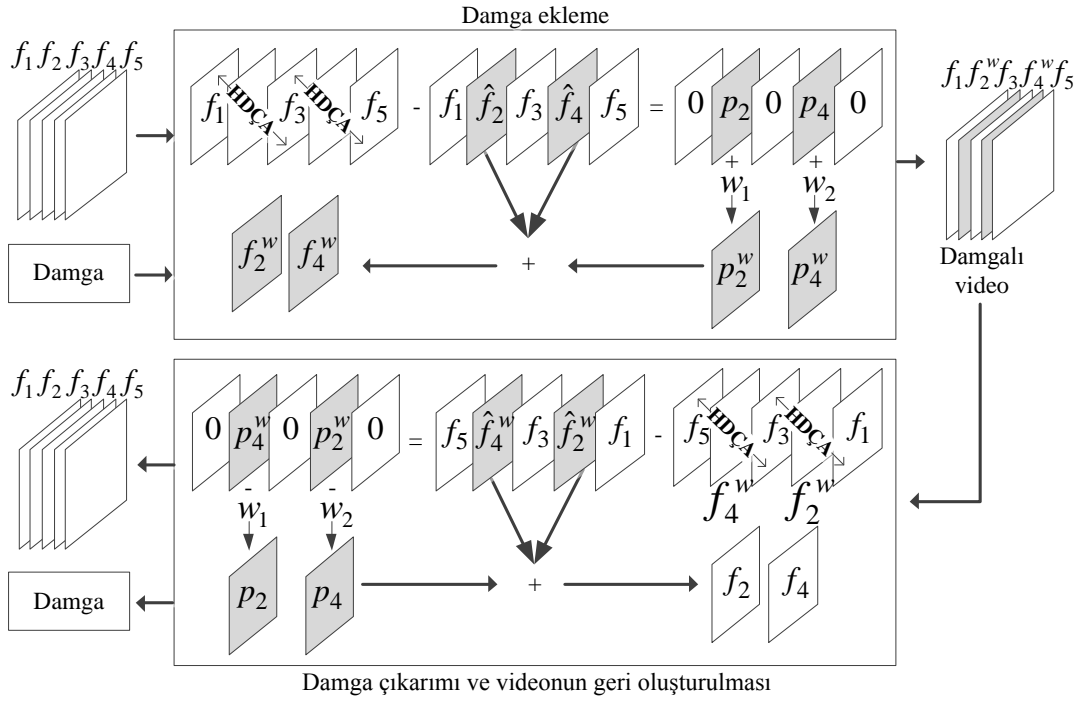
3.3. Önerilen Yöntem

Giriş kısmında bahsedildiği gibi sayısal görüntüler için geliştirilmiş Thodi ve Rodrigez'in yöntemi sayısal videoya uyarlandığında iki problemle karşılaşmaktadır. İlk problem, damgalı videolu çerçeveler kullanılarak damga eklemedeki aradeğerlenmiş çerçevelerinin aynılarının elde edilmesidir. İkincisi, toplam kapasitenin bozunum en az olacak şekilde video çerçevelerine nasıl dağıtılacağıdır. Önerilen yöntem tanıtılmadan önce iki problemin çözümü, aşağıda tartışılmıştır.

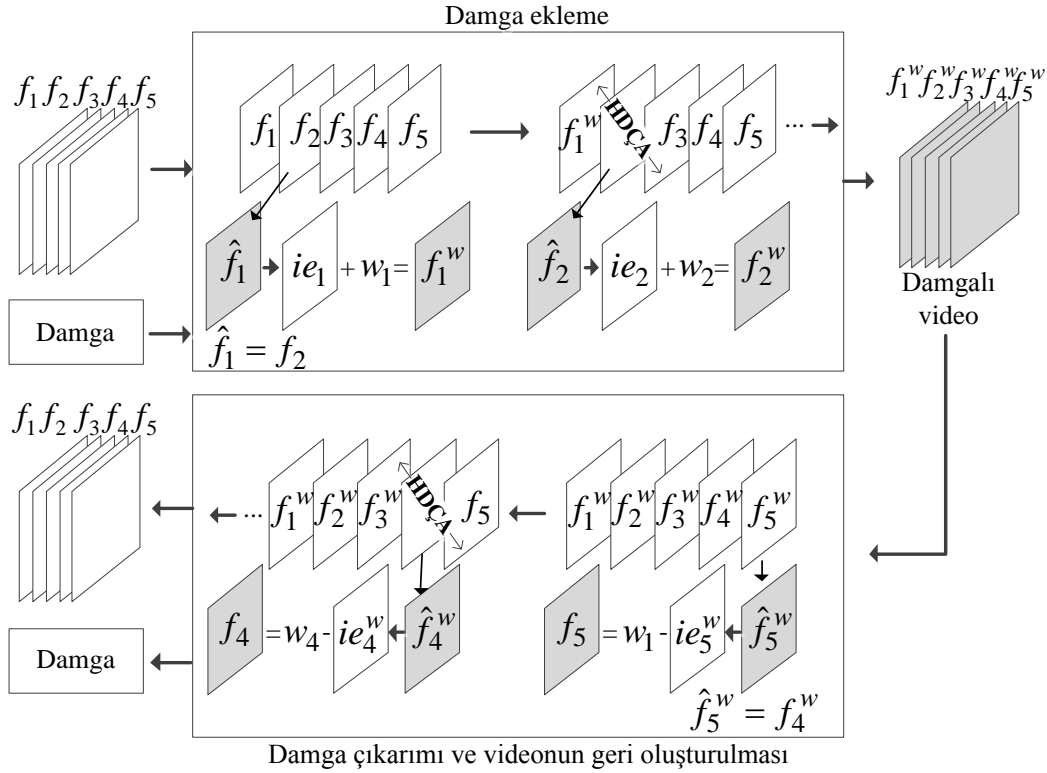
3.3.1. TVD için çerçeve aradeğerleme

Damga ekleme ve damga çıkartma esnasında aynı aradeğerleme hatasını elde etmek farklı iki şekilde sağlanabilir. İlk çözüm, videonun toplam beş çerçeveden oluştuğu varsayılarak Şekil 3.2'de verilmiştir. Çift numaralı çerçeveler, bilinmedikleri varsayılarak, tek numaralı çerçevelerden aradeğerlenir. Orijinal ile aradeğerlenmiş çift numaralı çerçeveler arasındaki fark aradeğerleme hatasını verir. Kısım 2.3.4'de anlatılan TD yöntemi sadece çift numaralı çerçevelere uygulanarak damgalı video elde edilir. Bu şekilde damgalama sonucunda tek numaralı çerçevelere herhangi bir değişiklik yapılmadığına dikkat ediniz. Bu nedenle, damgalı videoda gerçekleştirilecek aradeğerleme damga ekleme sırasındaki aradeğerleme hatasının aynısını verecektir.

Bu çözümün iki sınırlaması vardır. Birinci olarak, sadece çift numaralı çerçevelerin damgalama için kullanılması toplam kapasite için yeterli olmayabilir. İkinci olarak, videoda damgalama sonucunda oluşan bozunum düzgün değildir. Tek numaralı çerçeveler için bozunum yokken çift numaralı çerçeveler için bozunum vardır. Dolayısıyla, çerçeve numarasına göre çizilecek bir görsel kalite ölçütü düzgün olmayacaktır.



Şekil 3.2. Damga ekleme ve çıkartma esnasında aynı aradeğerleme hatası elde etmek amacıyla sadece çift numaralı çerçevelerin aradeğerlenmesi



Şekil 3.3. Damga ekleme ve çıkartma esnasında aynı aradeğerleme hatası elde etmek amacıyla tüm çerçevelerin aradeğerlenmesi. Damga ekleme ilk çerçeveden son çerçeveye doğru yapılırken, damga çıkartımı son çerçeveden ilk çerçeveye doğru gerçekleştirilir.

Hem tüm çerçevelerin damgalamada kullanılması hem de homojen bozunum oluşturma amacıyla Şekil 3.3'de beş çerçeve için anlatılan ikinci çözüm kullanılabilir. Damga ekleme ilk çerçeveden son çerçeveye doğru yapılmaktadır. İlk çerçevenin aradeğerlenebilmesi için kendisinden önce bir çerçeve bulunmalıdır. Bu bilgi mevcut olmadığından birinci çerçevenin aradeğerlenmiş orijinal ikinci çerçeve olarak varsayılır. Kısım 2.3.4'de anlatılan TD yöntemi kullanılarak birinci çerçeve damgalanır. Damgalı birinci çerçeve ve orijinal üçüncü çerçeve kullanılarak ikinci çerçeve aradeğerlenir. Aradeğerleme hatasından yararlanılarak ikinci çerçeve damgalanır. Bu işlem gerekli ise tüm çerçevelere uygulanır. Son çerçeve için, aradeğerleme amacıyla iki çerçeve mevcut olmadığından aradeğerlenmiş çerçeve damgalanmış dördüncü çerçeve olarak kabul edilir. Damga çıkartma son çerçeveden ilk çerçeveye doğru yapılmaktadır. Damgalanmış dördüncü ve beşinci çerçevelerden damga ekleme adımında kullanılan aradeğerleme hatasının aynısı ve dolayısıyla orijinal beşinci çerçeve elde edilir. İşlem geri kalan çerçevelere sırasıyla uygulanarak orijinal çerçeveler oluşturulur. İlk çerçeve için, aradeğerlenmiş çerçeve orijinal ikinci çerçeve olarak kabul edilir. Görüldüğü gibi tüm çerçeveler damgalanmaktadır ve videoda oluşan bozunum düzgündür.

3.3.2. Çerçevelerin kapasite parametrelerinin belirlenmesi

Kısım 2.3.4'te açıklanan TD yönteminde bir çerçeveye eklenebilecek bilgi miktarının kapasite parametresi t ile belirlendiği belirtilmiştir. Videoda ise birçok çerçeve olduğundan çerçevelerin kapasitesi tek tek belirlenmelidir.

Verilen bir t değeri için, genişletilebilen, ötelenebilen ve taşmaya ($[0,255]$ aralığının dışındaki piksel değerleri) neden olan piksel kümeleri sırasıyla $E(t)$, $S(t)$ ve $O(t)$ ile belirtilsin. $|\cdot|$ notasyonu bir kümedeki eleman sayısını göstermek üzere, bir çerçeveye eklenebilecek maksimum bilgi miktarı (kapasite) $|E(t)|$ 'dir. Ancak, çerçeveye damgaya ek olarak damganın çözülmesi gerekli yan bilgi ile damga ekleme sonucunda taşmaya neden olan piksellerin konumları da eklenmektedir.

Bir çerçeveye eklenecek damga bitlerinin sayısını P , çerçevedeki damgayı çözmek için gerekli yan bilginin ikili tabanda gösterilimindeki toplam bit sayısı YB ve çerçevede taşmaya neden olan piksellerin sayısı $|O(t)|$ olmak üzere, bir çerçeve için t parametresi,

$$|E(t)| \geq P + YB + [\log_2(MN)]|O(t)| \quad (3.1)$$

eşitsizliğini sağlayan en küçük tamsayı seçilir. Denklem (3.1)'deki $[\log_2(MN)]$ terimi $M \times N$ boyutundaki bir görüntünün bir pikselinin konumunu ikili tabanda temsil etmek için gerekli bir sayıdır. Video damgalamada, bozunum en az olacak şekilde verilen damganın video çerçevelerine nasıl dağıtılacağı önemli bir problemdir. Bu amaçla, sayısal görüntüler için kapasite parametresinin belirlenmesine yönelik analitik çözüm videoya uyarlanabilir [47]. Ancak, analitik çözümün uygulanabilmesi için Şekil 3.2'de verilen aradeğerleme yönteminin uygulanması gereklidir. Kısım 3.3.1'de belirtilen eksikliklerinden dolayı, bu çalışmada Şekil 3.3'de açıklanan yöntem tercih edilmiştir. Bu nedenle analitik çözüm geçerli değildir. Aşağıda optimum olmayan ancak pratikte kullanılabilir bir çözüm geliştirilmiştir.

Bir çerçeve için verilen t değeri damgalama sonucunda çerçevede oluşan bozunumu belirlemektedir. t ne kadar küçük ise çerçeveye yapılan bozunum o kadar azdır. Bu nedenle, başlangıçta tüm çerçeveler için kapasite parametresi mümkün en küçük değer olan 1 varsayılır. Denklem 1 kullanılarak çerçevelere eklenebilecek damga miktarları (P) belirlenir. Eğer çerçevelere eklenebilecek damga miktarlarının toplamı, videoya eklenecek damga biti sayısından az ise, t parametresi sadece ilk çerçeve için 1 arttırılır. Tüm çerçeveler için damga miktarları Denklem 1 kullanılarak yeniden hesaplanır. Videoya eklenmek istenen damga miktarına ulaşılmışsa bu işleme son verilir. Aksi halde her seferinde t parametresi sadece bir çerçeve için 1

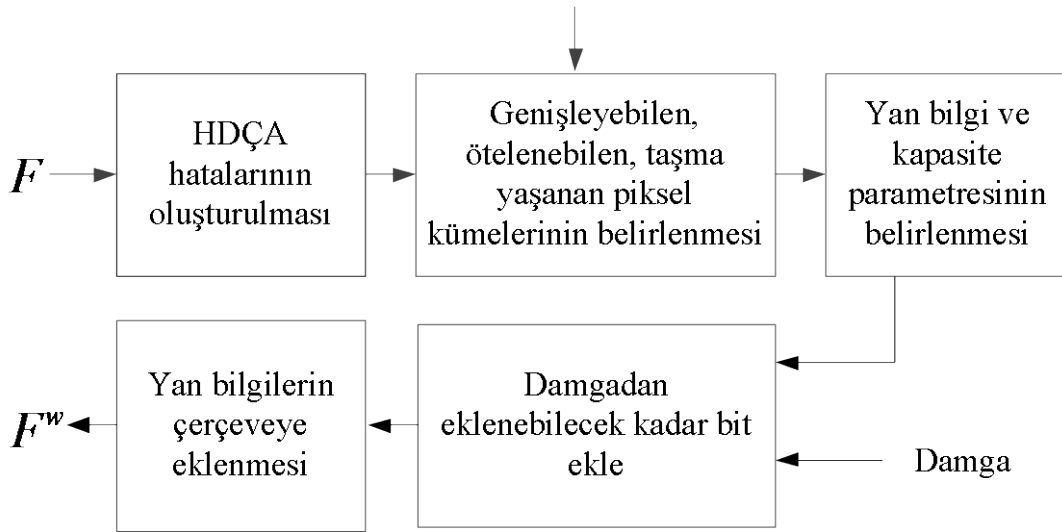
Tablo 3.1. Toplam kapasite sağlanıncaya kadar çerçevelerin kapasite parametrelerinin güncellenmesi. Videonun n çerçeveden oluştuğu varsayılmıştır.

Seviye	Çerçeve Numaraları					
	1.	2.	3.	.....	$(n - 1).$	$n.$
Kapasite Parametreleri						
1	1	1	1	.....	1	1
2	2	1	1	.....	1	1
3	2	2	1	.....	1	1
4	2	2	2	.....	1	1
.
.	t_1	t_2	t_3	.....	t_{n-1}	t_n
.
.	255	255	255	.....	255	254
.	255	255	255	.....	255	255

arttırılarak işleme devam edilir. Çerçeveler için t parametresinin nasıl güncellendiği Tablo 3.1’de verilmiştir. Çeşitli test video dizileri için yapılan denemelerde, birkaç adımda toplam kapasitenin sağlandığı görülmüştür.

3.3.3. Damga ekleme

Damga eklemeye ait blok diyagram Şekil 3.7’de verilmiştir. Damgalanacak orijinal videonun n çerçeveden oluştuğunu varsayalım. Orijinal videoda k . sırada olan bir çerçevenin (i, j) konumundaki pikselinin parlaklık seviyesi $F_k(i, j)$ ile belirtilsin. Piksel cinsinden çerçeve boy ve eni M ve N olmak üzere k . çerçeve $F_k = \{F_k(i, j) \mid 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$ şeklinde gösterilebilir. Damgalanacak video tüm çerçeveler topluluğu olup, $V = \{F_k: 1 \leq k \leq n\}$ kümesidir. Benzer şekilde, damgalı videoda k çerçevenin (i, j) konumundaki parlaklık seviyesi, k . çerçeve ve damgalı video sırasıyla $F_k^w(i, j)$, F_k^w , ve V^w ile temsil edilsin. $F_k(i, j)$ 'nin HDÇA ile elde edilen kestirimi $\hat{F}_k(i, j)$ olmak üzere k . çerçevenin (i, j) konumundaki aradeğerleme hatası $H_k(i, j)$ ile gösterilsin. Videoya eklenecek bit cinsinden bilgi miktarı N_c ve k . çerçevenin kapasite parametresi t_k olsun.



Şekil 3.4. Bir çerçeve için damga eklemeye ait blok diyagram

Damgalamaya başlandıktan sonra bit cinsinden eklenen toplam bilgi miktarı N_c değerine ulaşmamışsa, hangi çerçevenin kapasite parametresinin 1 arttırılacağını belirtmek amacıyla *son* değişkeni kullanılacaktır. Herhangi bir çerçevenin damgalanmış son çerçeve olup olmadığı 1 bitlik *sçb* (son çerçeve bayrağı) değişkeni belirtilir. Aşağıda verilen adımlar ilk çerçeveden son çerçeveye doğru olmak üzere orijinal çerçevelerdeki piksellere belirli bir sırada (soldan sağa, yukardan aşağıya) uygulanarak damgalı video oluşturulur.

Bir çerçeve için damga eklemeye karşılık gelen blok diyagram Şekil 3.4'te verilmiştir. Damga ekleme adımları aşağıda verilmiştir.

1. Değişkenlerin ilk değerleri $k = 1, son = 0, t_k = 1, 1 \leq k \leq n$ şeklinde seçilir.
2. HDÇA kullanılarak $\hat{F}_k(i, j)$ elde edilir ve $H_k(i, j) = F_k(i, j) - \hat{F}_k(i, j)$ oluşturulur. (İlk çerçeve için HDÇA'da kullanılacak 2 çerçeve mevcut olmadığından $\hat{F}_1 = F_2$ kabul edilir.)
3. $H_k(i, j)$ 'nin aldığı değerlere göre F_k 'daki pikseller aşağıda tanımlanan üç kümeden birisine dahil edilir.

a. Genişletilebilir pikseller kümesi:

$$E_k(t) = \{(i, j) \mid -t_k \leq H_k < t_k, 0 \leq F_k(i, j) + H_k(i, j) \leq 254\} \quad (3.2)$$

b. Ötelenebilir pikseller kümesi:

$$S_k(t) = \left\{ \{(i, j) \mid H_k(i, j) \geq t_k, F_k(i, j) \leq 255 - t_k\} \cup \{(i, j) \mid H_k(i, j) < -t_k, F_k(i, j) \geq t_k\} \right\} \quad (3.3)$$

c. Taşan pikseller kümesi: $O_k(t) = F_k - (E_k \cup S_k)$

F_k 'ya eklenebilecek maksimum bilgi miktarı $|E_k(t)|$ bittir. Ancak F_k 'daki damgayı çözmek için gerekli yan bilgi miktarı $YB_k = L + J_k$ bittir. Burada L , damga çözmeye gerekli olacak parametreleri saklamak için gerekli bit sayısını, J_k ise taşmaya neden olan piksellerin konumları ikili tabanda temsil edildiğinde toplam bit sayısı olup

$$L = 9 + 3[\log_2(MN)] \quad (3.4)$$

$$J = [\log_2(MN)] \times |O_k(t)| \quad (3.5)$$

eşitliklerinden hesaplanırlar. Dolayısıyla F_k 'ya eklenebilecek damga miktarı $P_k = |E_k(t)| - YB_k$ olacaktır.

4. Aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak, F_k 'ya P_k kadar damga biti eklenir ve damganın eklendiği son konum $lp1_k$ değişkeninde saklanır.

a. $(i, j) \in E_k(t)$ ise (3.6)

$$F_k^w(i, j) = F_k(i, j) + H_k(i, j) + b$$

b. $(i, j) \in S_k(t)$ ise (3.7)

$$F_k^w(i,j) = \begin{cases} F_k(i,j) + t, & H_k(i,j) \geq t \\ F_k(i,j) - t, & H_k(i,j) < -t \end{cases} \quad (3.8)$$

c. Aksi takdirde, $(i,j) \in O_k(t)$ olduğundan, $F_k^w(i,j) = F_k(i,j)$ 'dir.

Burada $b \in \{0,1\}$ damga bitidir.

5. F_k^w 'dan F_k 'yı geri elde edebilmek için gerekli olan yan bilgiler ($YB_k = L + J_k$) aşağıdaki adımlar kullanılarak F_k^w 'ya eklenir.

- a. F_k^w 'nın ilk YB_k pikselinin parlaklık seviyelerinin ikili tabandaki gösterilimlerindeki en az anlamlı bitleri LSB_{F_k} ile belirtilen bir dizide saklanır.
- b. Adım 4'te verilen damgalama kullanılarak LSB_{F_k} 'daki bitler $lp1_k$ 'nın belirttiği konumdan bir sonraki pikselden itibaren F_k^w 'ya eklenir. En son damgalanan pikselin konumu $lp2_k$ değişkeninde saklanır.
- c. $\sum_{z=1}^k P_k < N_c$ (yani k . çerçeveye kadar eklenen damga miktarı, damga biti sayısından küçük) ise $s\check{c}b = 0$, aksi halde $s\check{c}b = 1$ yapılır.

Şekil 3.5'de yan bilgilerin adları ve yan bilgilerin kaç bit ile temsil edildiği gösterilmektedir. t , $b\check{s}ç$, $|O_k(t)|$, $lp1_k$, $lp2_k$ ve taşma olan piksel konumlarının ikili tabanındaki gösterilimlerine karşılık gelen bitler, F_k^w çerçevesinin ilk YB_k pikselinin en az anlamlı bitleri ile yer değiştirilerek damgalı çerçeve elde edilmiş olur.

6. Eğer $s\check{c}b = 1$ (yani tüm damga bitleri damgalamada kullanılmış ise) ve $son = n$ ise, tüm çerçeveler damgalanmıştır. Eğer $s\check{c}b = 1$ ve $(son < n)$ ise, damgalama son çerçevesine kadar gerçekleştirilmiş ve diğer çerçeveler orijinal olarak damgalı video dizisinde kalmıştır. Her iki durumda da damgalama tamamlanmıştır, aksi halde bir sonraki adımdan devam edilir.

7. Bir sonraki çerçeveye geçilir $k = k + 1$.

- a. Eğer $k < n$ ise adım 3'ten devam edilir.
- b. Eğer $k = n$ ise, son çerçeve için HDÇA'da kullanılacak 2 çerçeve mevcut olmadığından $\hat{F}_k = F_{k-1}^w$ kabul edilir ve adım 3'den devam edilir.
- c. Eğer $k > n$ ise aşağıdaki adımlar uygulanır.

$$- \quad son = \begin{cases} son + 1, & son < n \\ 1, & son = n \end{cases}$$

$$- \quad t_{son} = t_{son} + 1$$

- Eğer $t_{k=son} > 255$, verilen damga videoya eklenemez. Aksi halde $k = 1$ yapılır, adım 2'den devam edilir.

3.3.4. Yan bilginin oluşturulması

Önerilen yöntemde yan bilgiler, damga ekleme esnasında orijinal çerçevelere eklenir ve damga çıkarma esnasında damgalı çerçevelerden geri oluşturulur. Bu nedenle orijinal çerçevelerin belirli bir kısmı yan bilgileri saklamak amacıyla kullanılmaktadır.

Bir çerçeve için yan bilgiyi oluşturan bileşenler Şekil 3.5'deki gibidir. Kapasite parametresi t , çerçevenin damgalanan son çerçeve olup olmadığını belirtmek amacıyla 1 bitlik bir bayrak ($sçb$), taşmaya neden olan piksellerin sayısı, çerçevelere ek bilginin eklenmeye başladığı piksel konumu $lp1_k$, ek bilginin eklendiği son piksel konumu $lp2_k$, taşmaya neden olan piksellerin konuları yan bilgiyi oluşturmaktadır.

t $[0,255]$ aralığında değer aldığından her biri 8 bit ile temsil edilir. Çerçeve boyutu $M \times N$ olmak üzere herhangi bir pikselin konumu $\log_2[MN]$ bit ile temsil edildir. Bu yüzden $lp1_k$ ve $lp2_k$ 'yi saklamak için gerekli bit uzunluğu $\log_2[MN]$ bitdir.

(t)	$sçb$	$|O_k(t)|$	$lp1_k$	$lp2_k$	Taşma Konumları
8 bit	1 bit	$\lceil \log_2(MN) \rceil$ bit	$\lceil \log_2(MN) \rceil$ bit	$\lceil \log_2(MN) \rceil$ bit	$\lceil \log_2(MN) \rceil \times |O_k(t)|$ bit

\leftarrow $\xrightarrow{\hspace{10em}}$
 L J_k

Şekil 3.5. Yan bilgileri temsil etmek için gerekli bit miktarları

Taşmaya sebep olan piksel sayısı $|O(k, T_{cp})|$, $\log_2[MN]$ bit ile temsil edilir. Taşmaya sebep olan piksel konumlarını tutmak için gerekli bir uzunluğu $\log_2[MN] \times |O(k, T_{cp})|$ 'dir.

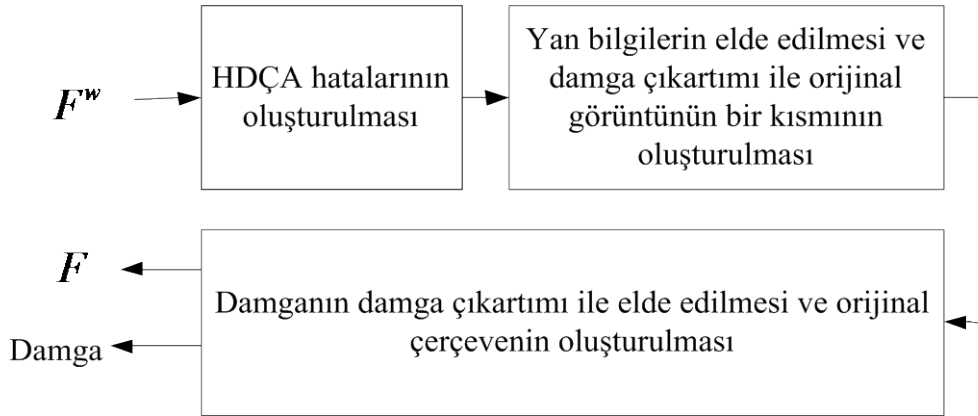
3.3.5. Damga çıkarmayı ve orijinal video çerçevelerinin oluşturulması

Damga çıkarmaya ait blok diagram Şekil 3.8'de verilmiştir. Bir çerçeve için damga çıkartma ve orijinal çerçevenin oluşturulmasına karşılık gelen blok diyagram Şekil 3.6'de verilmiştir. Son çerçeveden başlanarak işlemler çerçeve piksellerine belirli bir sırada uygulanarak orijinal video çerçeveleri oluşturulur ve damga çözülür. Aşağıdaki tartışmada bütün çerçevelerin damgalandığı varsayılmıştır. Bu varsayımın geçerli olmadığı durumda sadece k 'nın başlangıç değeri farklı olacaktır.

1. $k = n$

2. F_k^w 'nin ilk YB_k piksellerinin parlaklık seviyelerinin ikili tabandaki gösterimlerdeki en az anlamlı bitlerinden t , $sçb$, $|O_k(t)|$, $lp1_k$, $lp2_k$ ve taşmaya neden olan piksellerin konumları belirlenir.

3. HDÇA kullanılarak \hat{F}_k^w elde edilir ve $H_k^w(i, j) = F_k^w(i, j) - \hat{F}_k^w(i, j)$ oluşturulur. (Son çerçeve için HDÇA'da kullanılacak 2 çerçeve mevcut olmadığından $\hat{F}_k^w = F_{n-1}^w$)



Şekil 3.6. Bir çerçeve için damga çıkarma ve orijinal videonun oluşturulmasına ait blok diyagram

4. $lp2_k$ ile $lp1_k$ değişkenlerinin belirttiği pikseller arasındaki piksellere aşağıdaki damga çıkartımı uygulanarak orijinal LSB_{F_k} dizisi tespit edilir.

a. $(i, j) \in O_k(t)$ ise, $F_k^w(i, j) = F_k(i, j)$ 'dir.

b. $-2t \leq H_k^w(i, j) \leq 2t$ ise, damgalanmış veri biti

$$b = H_k^w(i, j) - 2[H_k^w(i, j)] \quad (3.9)$$

ve orijinal piksel değeri

$$F_k(i, j) = F_k^w(i, j) - \left\lfloor \frac{F_k^w(i, j)}{2} \right\rfloor - b \quad (3.10)$$

denklemlerle hesaplanır.

c. Aksi takdirde, piksel damga biti taşımamaktadır. Orijinal piksel değeri;

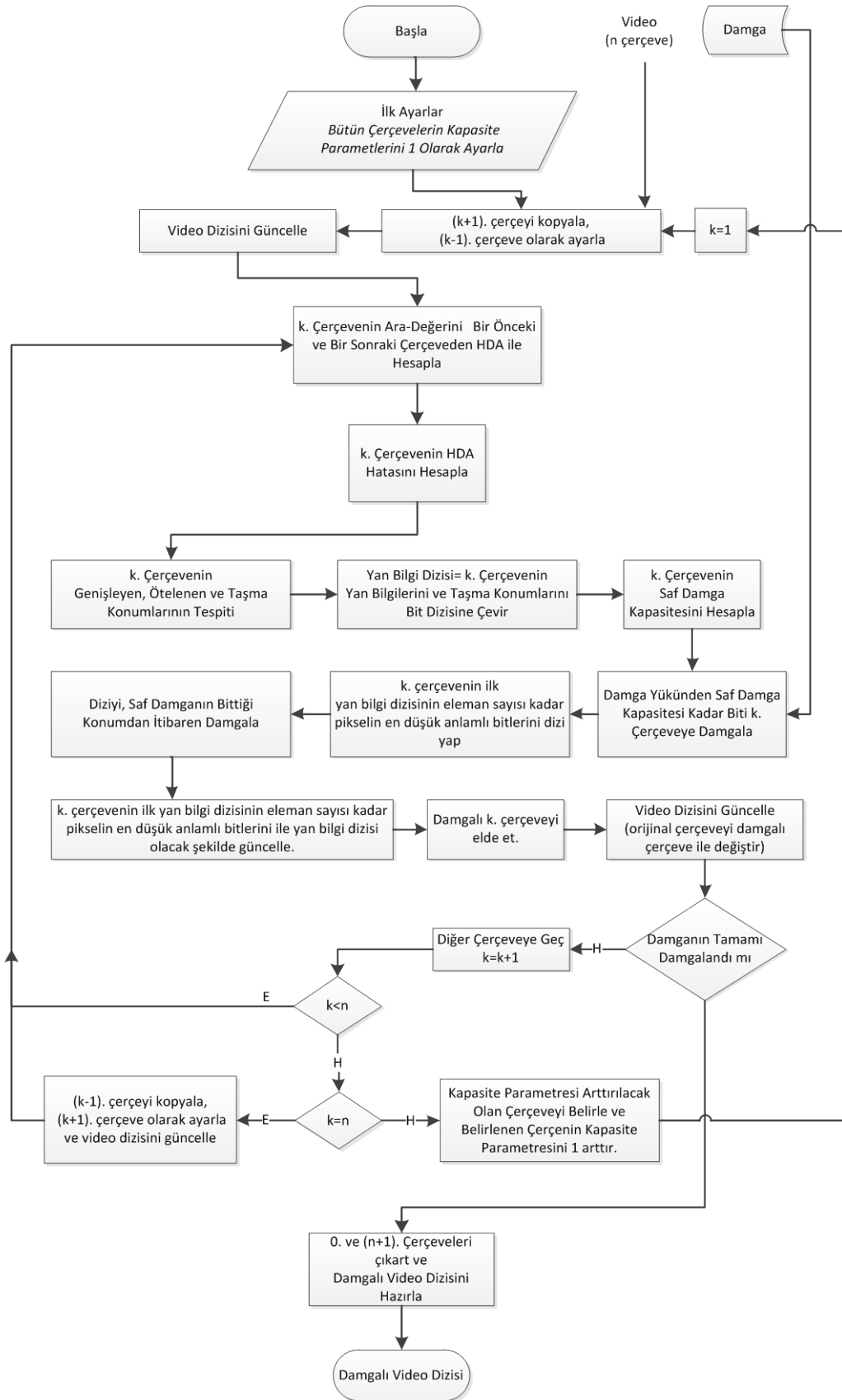
$$F_k(i, j) = \begin{cases} F_k^w(i, j) - t, & H_k^w(i, j) \geq 2t \\ F_k^w(i, j) + t, & H_k^w(i, j) < -2t \end{cases} \quad (3.11)$$

denklemlerle elde edilir.

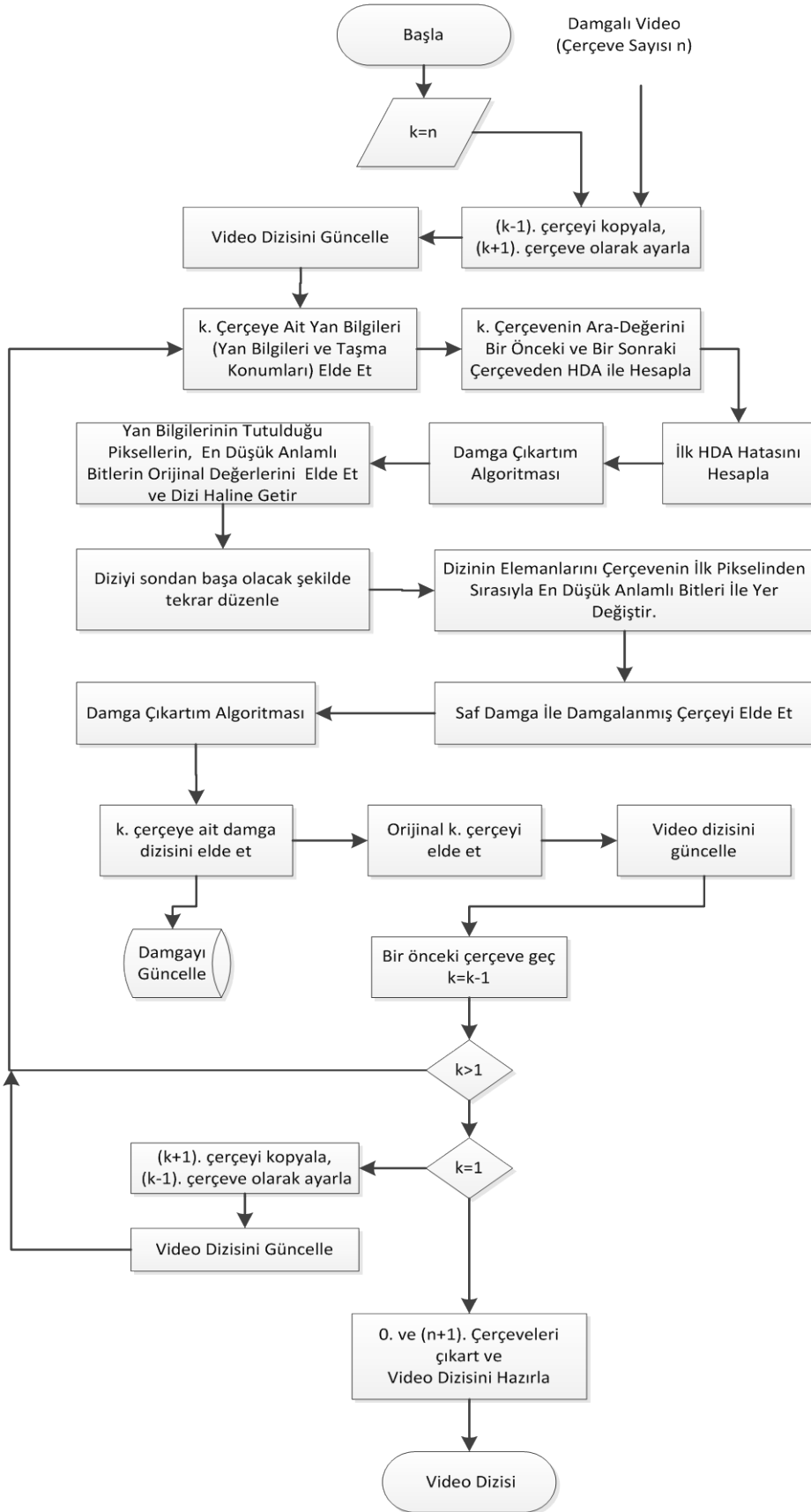
5. F_k^w 'nin ilk YB_k pikselinin parlaklık seviyelerinin ikili tabandaki gösterimlerindeki en az anlamlı bitler LSB_{F_k} dizisindeki bitler ile değiştirilerek orijinal F_k^w tespit edilir.

6. Adım 4'teki işlemler birinci ile $lp1_k$ değişkenin belirttiği piksel arasındaki piksellere uygulanarak orijinal $F_k(i, j)$ değerleri oluşturulur ve damga çıkarılır.

7. Bir önceki çerçeveye geçilir ($k = k - 1$). $k > 1$ ise adım 3'ten başlanarak işlemler tekrarlanır. $k = 1$ ise $\hat{F}_1^w = F_2$ varsayılır. $k = 0$ ise damga çözme işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 3.7. Bir video dizisinin önerilen yöntem ile damgalanmasına ait blok diagram



Şekil 3.8. Bir video dizisinden önerilen yöntem ile damga çıkarılması ve orijinal videonun oluşturulması



Şekil 3.9. Önerilen yöntemin performansını incelemek amacıyla kullanılan test videolarından örnek çerçeveler

3.4. Deneysel Sonuçlar

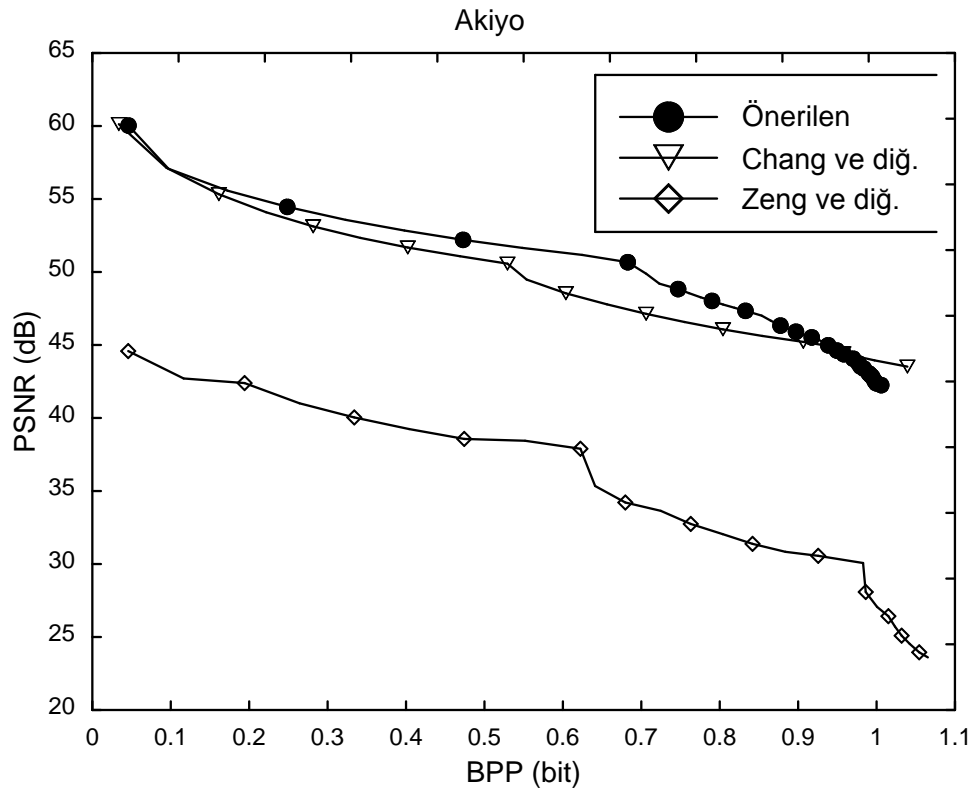
Önerilen yöntemin performansı Şekil 3.9’da birer çerçeveleri gösterilen test videoları için incelenmiştir. Çerçeveler CIF formatındadır, saniyedeki çerçeve sayısı 15’dir ve simülasyonlarda 5 saniye süreli videolar kullanılmıştır. Test videoları seçilirken hareketin çeşitli olmasına dikkat edilmiştir. Akiyo dizisinde hemen hemen hiç hareket yokken, Foreman dizisinde orta düzeyde hareket vardır. Hall-Monitor ve Bus dizilerinde ise oldukça karmaşık hareketler mevcuttur. Simulasyonlarda rastgele oluşturulan bit dizileri eklenecek damga olarak kullanılmıştır. Çeşitli yöntemlerin performanslarını karşılaştırmak amacıyla piksel başına damga miktarı (BPP) ve tepe işaret-gürültü-oranı (PSNR) kullanılmıştır. N_c videoya eklenen bit sayısı, M ile N çerçevelerin piksel cinsinden en ve boy uzunluğu ve videodaki toplam çerçeve sayısı n olmak üzere, BPP

$$\text{BPP} = \frac{N_c}{MNn} \quad (3.12)$$

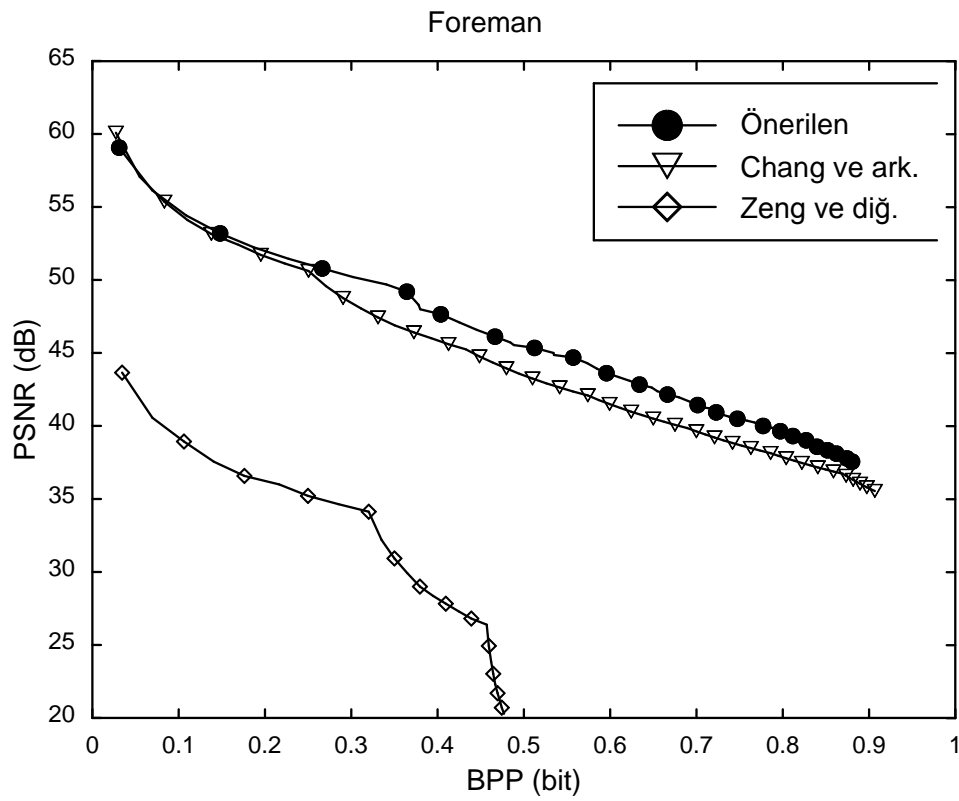
eşitliğinden hesaplanır. Görsel video kalitesini veren PSNR desibel cinsinden

$$\text{PSNR} = 10 \log \left(\frac{255 \times 255}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (F_k(i, j) - F_k^w(i, j))^2} \right) \quad (3.13)$$

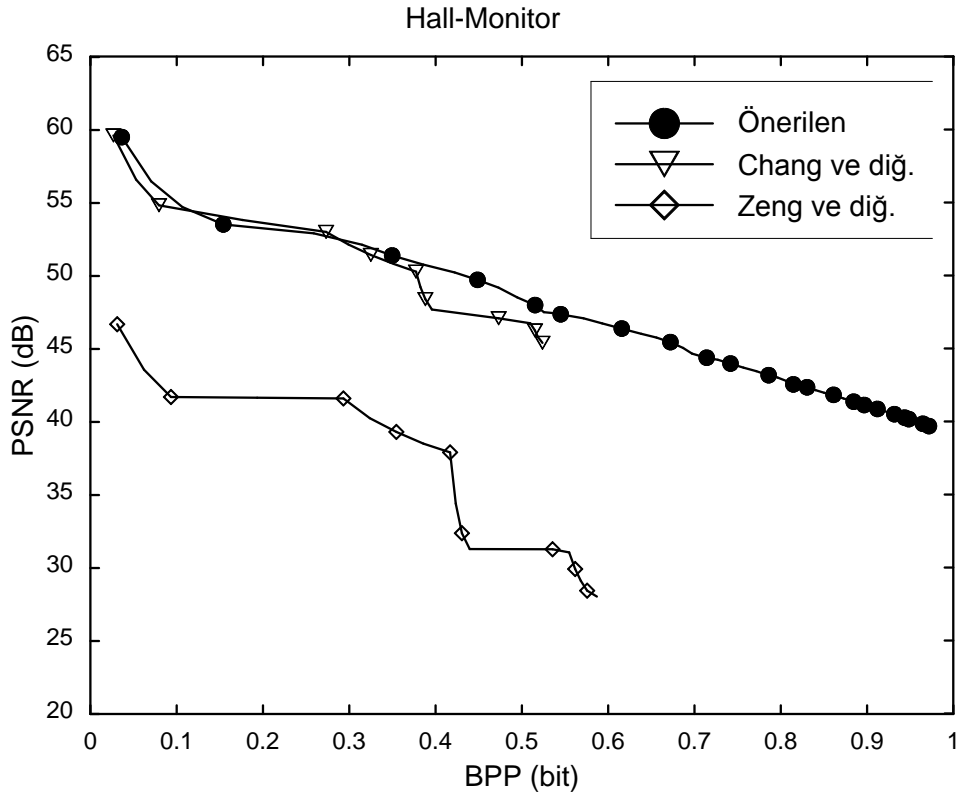
denkleminde hesaplanır. Denklemden $F_k(i, j)$ ile $F_k^w(i, j)$ sırasıyla orijinal ve damgalı çerçevelerin piksellerinin parlaklık seviyelerini göstermektedir.



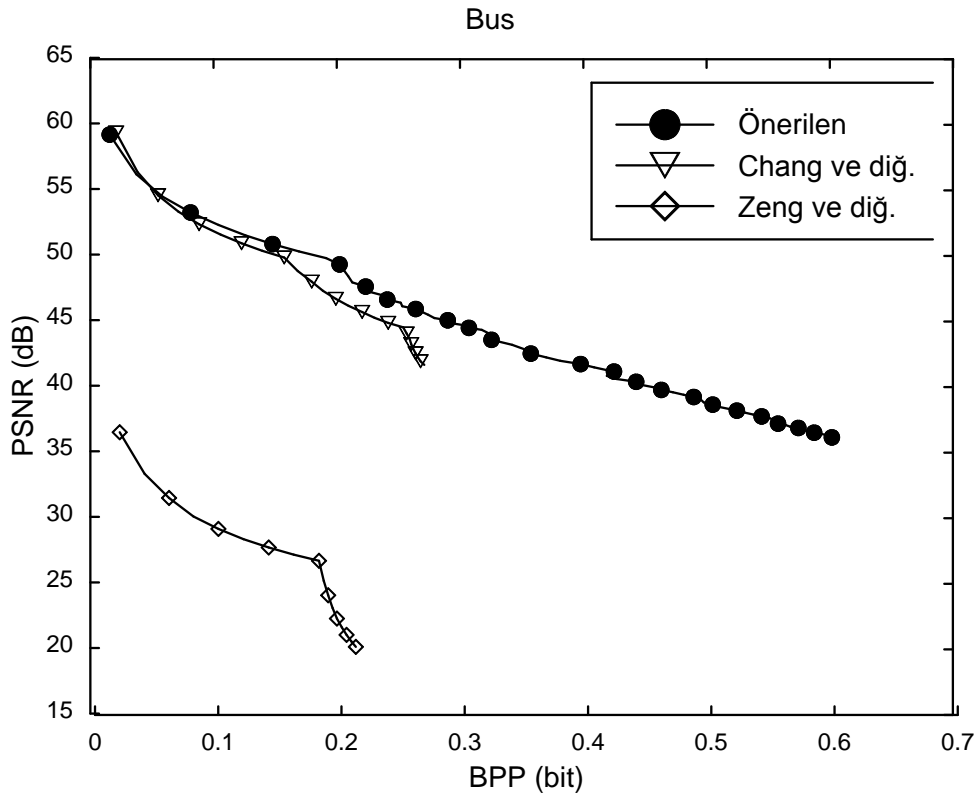
Şekil 3.10. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Akiyo dizisi için performansı



Şekil 3.11. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Foreman dizisi için performansı



Şekil 3.12. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Hall Monitor dizisi için performansı



Şekil 3.13. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Bus dizisi için performansı

Önerilen yöntem, Kısım 2’de tanıtılan HDÖ’ye dayalı yöntemlerle iki açıdan karşılaştırılmıştır: (i) verilen bir N_c için orijinal videoda oluşan bozunum, (ii) damga çözme esnasında gerekli yan bilgi miktarı.

Zeng ve ark.’a ait yöntemde çerçevenin hareket dengelenmiş öngörüsü tespit edilerek çerçeve bazlı damgalama uygulanmaktadır [33]. Damga çözmek için blokların hareket vektörlerine, çerçevelere ait histogramların maksimum (bazen minimum) değerlerine ve taşma konumları için sınır haritasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yöntemin görsel kalitesi iyi değildir. Chung ve ark.’a ait yöntemde blok temelli bir damgalama yapılmaktadır [34]. Damga çözmek için blokların hareket vektörlerine ek olarak blok öngörü hatasının histogramına ait maksimum ve minimum noktalarının bilinmesi gereklidir. Yan bilginin fazlalığından dolayı yöntemin kapasitesi düşüktür. Yukarıda tanıtılan yöntemlerin kapasitesi çok seviyeli damgalama arttırılabilir. Ancak, seviye sayısına bağlı olarak kapasitedeki artış doğrusal değildir ve video kalitesi hızla kötüleşmektedir. Örneğin Zeng ve ark.’a ait yöntemde Akiyo, Foreman, Hall-Monitor ve Bus dizileri için sırasıyla 3,2,3,2 seviyelerine kadar damgalama yapılmaktadır. Bu seviyelerden sonra çerçevelere ait yan bilgi sayıları çerçevelerin kapasitesini geçtiğinden damgalama yapılamamaktadır. Chung ve ark’a ait yöntemde ise Akiyo ve Foreman dizileri yüksek seviyelere kadar (5-6) damgalanabilmekte fakat Hall ve Bus dizileri ancak sırasıyla 2 ve 3 seviyeli damgalama yapılabilmektedir.

Yöntemlerin BPP’nin fonksiyonu olarak sağladıkları görsel video kalitesi dört test videosu için Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’te verilmiştir. Eğrilerden aşağıda verilen sonuçlar çıkartılabilir. İlk olarak, eklenen bilgi miktarı arttıkça üç yöntemin verdiği görsel video kalitesi kötüleşmektedir. Ancak, önerilen yöntem, diğer yöntemlerden daha iyi sonuç vermektedir. Üç yöntemde de video kalitesinde ani düşüşler olmaktadır. Bunun nedeni karşılaştırılan çalışmalarda seviye artışı, önerilen yöntemde ise ilk çerçevenin kapasite parametresinin arttırılışdır. Örneğin Foreman dizisinde, Zeng ve ark.’ın yönteminde 0,32 BPP’de video kalitesinde ani bir düşüş görülmektedir. Bunun nedeni 0,32 BPP’de 2 seviyeli damgalamaya geçme zorunluluğudur. Benzer bir olay Chung ve ark.’ın yönteminde 0,22 BPP’de

Tablo 3.2. [33] ve [34] yöntemlerinde çoklu seviye damgalamanın kapasiteye etkisi ve yan bilgi miktarları

Level	Chang ve Ark. [13]		Zeng ve Ark. [14]	
	Ort. Toplam Kapasite (bit)	Ort. Toplam Yan Bilgi Sayısı (bit)	Ort. Toplam Kapasite (bit)	Ort. Toplam Yan Bilgi Sayısı (bit)
Akiyo				
1	55498,3	1830,2	63296,1	196.5
2	99369,2	3711,4	100084,1	446.7
3	136573,2	9229,7	114976,3	4555.2
Hall-Monitor				
1	40308,5	2052,9	42840,6	586.6
2	70139,7	12570,1	64948,1	1887.2
3	91230,8	27968	72677,2	4141.5
4	106957,2	50855,2	77101	11843.3
Foreman				
1	27550,5	2158,8	32504.1	41.4
2	48280,7	4407,7	46436.3	114.2
3	64907,3	6709,3	58645.2	4073.1
4	78995,4	10142,4	-	-
5	91257,3	12875,4	-	-
6	102216,9	15638,6	-	-
7	112137	22469,5	-	-
Bus				
1	18097,6	2535,7	18808,8	386.3
2	32128,1	6781,6	27494,5	1848.1
3	43991,3	13101,5	32284,8	6488.5
4	54381,3	24690,5	36936,7	26927
5	63814,6	37500,1	-	-

yaşanmaktadır. Önerilen yöntemde ise video kalitesinde ilk düşüş ilk çerçevenin kapasite parametresinin artmasından dolayı 0,36 BPP'de oluşmaktadır.

İkinci olarak, yöntemlerin performansı videodaki hareketin karmaşıklığından etkilenmektedir. Hareketin çok az olduğu Akiyo dizisinde yöntemlerin davranışı oldukça benzerdir. Orta seviyedeki hareketin mevcut olduğu Foreman dizisinde önerilen yöntem diğer yöntemlerden daha iyi sonuç vermektedir. Karmaşık hareketlerin bulunduğu Hall-Monitor ve Bus dizilerinde ise önerilen yöntem diğer yöntemlerden çok daha iyidir. Özetle, yöntemler durağan videolarda benzer performansa sahipken, video dizisindeki hareketin karmaşıklığı arttıkça önerilen ile diğer yöntemlerin performansları arasındaki fark önerilen yöntem lehine açılmaktadır.

Üçüncü olarak, diğer yöntemlerin sağladığı kapasite video içeriğine bağlıdır. Videodaki hareketin karmaşıklığı arttıkça ulaşılabilecek kapasite düşmektedir. Önerilen yöntemde de benzer bir durum olmakla birlikte kapasitedeki düşüş diğer yöntemlerdeki kadar olmamaktadır. Örneğin, Akiyo dizisi için önerilen ve diğer yöntemlerde kapasite 1 BPP seviyesine kadar çıkabilirken, Hall-Monitor videosunda ise önerilen yöntemde 1, diğer yöntemlerde ise sırasıyla 0.58 ve 0.53 BPP seviyelerine kadar çıkılabilmektedir.

Önerilen ve karşılaştırma için kullanılan yöntemler için damga çözmede gerekli yan bilgi miktarları Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'de verilmiştir. Yan bilgi hesaplanırken aşağıda verilen hususlar göz önünde bulundurulmuştur. Zeng ve ark.'a ait yöntemde bir sınır haritası oluşturulmaktadır. Ayrıca histograma ait her parametre (4 parametre mevcuttur) 4 bit ile temsil edilmektedir. Chung ve ark.'ın yöntemi için sınır haritası yerine taşma konumları saklanmaktadır. CIF formatındaki videolar için her taşma konumu en az 17 bit ile temsil edilmektedir. Yöntemdeki her bir bloğa ait bir (bazen iki) parametre saklanması gereklidir. Bu parametreler 4 bit ile temsil edilmektedir. Tüm yöntemlerde hareket kestirimi için blok boyutu 16×16 ve BEA için arama penceresi boyutu 64×64 olarak seçilmiştir. Önerilen yöntemde hareket vektörleri saklanmamaktadır, karşılaştırma için kullanılan yöntemlerde ise hareket vektörleri 8 bit ile temsil edilmektedir.

Karşılaştırılan yöntemlerde damga eklemede kullanılan orijinal blok hareket vektörleri damgalı videodan tespit edilememektedir. Bu nedenle, orijinal hareket

vektörlerinin damga çözücüyeye iletilmesi gereklidir. Çerçeve ve blok boyutlarına bağlı olarak iletilmesi gereken blok hareket vektörleri oldukça fazla olabilir. Önerilen yöntemde orijinal blok hareket vektörleri damgalı videodan elde edilebildiğinden iletilmeleri gerekli değildir. Ayrıca, önerilen yöntemde yüksek kapasitelere bir seviyeli damgalama ile ulaşılabilirken karşılaştırılan yöntemler yüksek kapasitelere ancak çok seviyeli damgalama ile ulaşabilmektedir. Karşılaştırılan yöntemlerde taşmaya neden olan piksellerin konumları veya sınır haritası ile öngörü hatası histogramının en büyük ve bazen en küçük noktaları her seviye için saklanır ve damga çözücüyeye yan bilgi olarak iletilir. Sonuç olarak, seviye sayısı arttıkça yan bilgi miktarı hızlı bir şekilde artmaktadır.

Seviye sayısına bağlı olarak, karşılaştırılan yöntemlere ilişkin ulaşılacak ortalama toplam kapasite ve ortalama yan bilgi miktarı Tablo 3.2’de verilmiştir. Seviye sayısı arttıkça kapasitenin doğrusal olarak artmadığı görülmektedir. Örneğin, Zeng ve ark.’ın yönteminde Hall-Monitor dizisi için bir seviyeli damgalamada ulaşılan kapasite 40383.4 bit, üç seviyeli damgalamada 91230,8 bit değerine yükselmiştir. Eğer Hall videosu için damgalama seviyesi arttırıldığında üçüncü seviyede bazı çerçevelerin kapasitenin negatif değerler aldığı ve damgalanamadığı tespit edilmiştir. Fakat seviyeye ait toplam kapasitedeki artış pozitifdir. Ancak seviye sayısının bir kez daha arttırılması ile kapasite negatif değer almaktadır. Örneğin üçüncü seviyedeki toplam kapasite 91230,8 bit iken, dördüncü seviyede toplam kapasite 106957,2 bit değerine yükselmiştir. Fakat yan bilgi sayısındaki ($50855.2 - 27968 = 22887.1$ bit) artış kapasitedeki artıştan daha yüksektir. Üçüncü seviyede bazı çerçevelerin negatif kapasiteye sahip olması veya dördüncü seviyede videonun kapasitesindeki artışın negatifliği, videonun ikinci seviyeden sonra damgalanamadığını göstermektedir. Bus videosuda, üçüncü seviyeden sonra kapasitedeki artış negatif olmaktadır.

Önerilen yöntemde toplam kapasiteyi kapasite parametresi belirlemektedir. Kapasite parametresine bağlı olarak ortalama toplam kapasite ve ortalama yan bilgi miktarı Tablo 3.3’te verilmiştir. Diğer yöntemlerdekine benzer bir şekilde kapasite parametresi arttıkça yan bilgi miktarı artıp, toplam kapasitenin hızla artmasını engellemektedir. Ancak toplam kapasitedeki artış diğer yöntemlerdekinden daha belirgindir. Örneğin Foreman dizisi için $t=1$ iken yan bilgi miktarını 76.6 bit iken,

Tablo 3.3.Önerilen yöntemde kapasite parametresinin kapasiteye etkisi ve yan bilgi miktarları

<i>t</i>	Akiyo		Hall-Monitor		Foreman		Bus	
	Ortalama Toplam Kapasite (bit)	Ortalama Toplam Yan Bilgi Sayısı (bit)	Ortalama Toplam Kapasite (bit)	Ortalama Toplam Yan Bilgi Sayısı (bit)	Ortalama Toplam Kapasite (bit)	Ortalama Toplam Yan Bilgi Sayısı (bit)	Ortalama Toplam Kapasite (bit)	Ortalama Toplam Yan Bilgi Sayısı (bit)
1	69214,8	2111,5	45477,4	1202	36933,9	76,6	20113,9	2273
2	86540,7	2293,4	66503,2	9946,8	58134	114	32461,9	5270,1
3	94624	2325,7	79676,1	11102,8	70196,7	137,8	42693,1	7434,2
4	98357,2	2346,1	88463,8	11468,3	78782,7	115,7	49753,7	8676,9
5	100097,3	2390,3	94145,9	11740,3	84647,1	122,5	55929,9	9299,1
6	101129,8	2439,6	97790,7	11833,8	88327,9	125,9	60614,7	9792,1
7	105879,9	2441,7	101852,1	11845,9	91007,4	124,2	64354	10128,7

$t=6$ olduğunda sadece 122.5 bit değerine yükselmektedir. Kapasite ise yaklaşık 2.4 kat büyümüştür. Aynı zamanda, video kalitesi kabul edilebilir (37.91 dB) bir seviyededir. Kapasite parametresinin artışı Akiyo ve Foreman dizilerinde yan bilgi sayısının artışı etkilemezken, Hall-Monitor ve Bus videolarında aynı şeyi söylemek mümkün değildir.

Zeng ve ark.'ın yöntemi ilk seviyelerde az yan bilgi miktarına sahip olsa da, damgalayabileceği seviye sınırlıdır. Kapasitesi düşüktür. Fakat negatif kapasitede olsa damgalamaya devam edilmesi durumunda yan bilgi sayısı giderek yükselmekte ve video kalitesi kötüleşmektedir. Chung ve ark.'ın yöntemi her zaman en yüksek yan bilgi sayısına sahiptir. Bu nedenle saf kapasitesi düşüktür. Önerilen yöntem de ise diğer yöntemlere göre az yan bilgi miktarına sahiptir. Aynı zamanda yüksek kapasitelerde bile kalitenin korunduğu görülmektedir.

3.5. Tartışma

Bu bölümde yeni bir tersinir video damgalama yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen yöntem, hareket dengelenmiş öngörü hatalarının histogramının değiştirilmesine dayalı mevcut yöntemlerden farklı olarak hareket dengelenmiş çerçeve aradeğerleme hatalarının genişletilmesine dayalıdır. Yöntemin verilen bir kapasite için diğer yöntemlere göre orijinal videoda daha az bozunum oluşturduğu bilgisayar benzetimleri ile gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen yöntemde orijinal hareket vektörleri damgalı videodan tespit edilebildiğinden damga çıkarmada gerekli yan bilgi miktarı mevcut yöntemlere kıyasla oldukça azdır.

BÖLÜM 4. HAREKET DENGELENMİŞ ÖNGÖRÜ HATALARININ UYARLANIR GENİŞLETİLMESİNE DAYALI TERSİNİR DAMGALAMA VE PİKSEL SEÇME

4.1. Giriş

Bu bölümde hareket dengelenmiş öngörü hatalarının genişletilmesine dayalı bir uyarlamalı TVD yöntemi geliştirilmiştir. Hareket dengelenmiş çerçevelere ait bloklar, öngörü hatasının aldığı değerlere göre düzgün ve düzgün olmayan şekilde sınıflandırılmıştır. Öngörü hatasından bağımsız olarak tüm blokları aynı şekilde damgalayan mevcut TVD yöntemlerinden farklı olarak önerilen yöntem düzgün ve düzgün olmayan bloklar için farklı damgalama yaklaşımları kullanmaktadır. Bu uyarlamalı yaklaşımın kapasiteyi arttırdığı gösterilmiştir. Ek olarak, damgalı videoda yüksek bozunuma sebep olan piksellerin belirlenmesine imkan veren bir yöntem önerilmiştir ve bu pikseller damgalamada kullanılmayarak orijinal videoda oluşan bozunum azaltılmıştır. Önerilen yöntem deneysel çalışmalarda sıklıkla tercih edilen test videolarına uygulanmıştır. Önerilen yöntemin kapasite ve bozunum bakımından mevcut yöntemlere göre üstün olduğu benzetimlerle gösterilmiştir.

Bölüm aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. Çalışmaya altyapı oluşturmak amacıyla HDCÖ Bölüm 2'de tartışılmıştır. Önerilen yöntem ve X. Li ve ark. tarafından sunulan algoritmanın video uyarlanmasında karşılaşılan problemlerin çözümü için geliştirilen özgün fikirler Kısım 4.2'te açıklanmıştır. Önerilen yöntemin kapasite ve görsel kalite bakımından performansı bilgisayar simülasyonları aracılığıyla Kısım 4.3'te incelenmiş ve HDÖ hatasına dayalı yöntemlere göre üstün olduğu gösterilmiştir. Son olarak, Kısım 4.4'de çalışmanın en önemli gözlemlerini vurgulayan özet yapılmış ve olası araştırma konuları listelenmiştir.

4.2. Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemde, damga ekleme, blok sınıflandırma, piksel seçme ve uyarlamalı damgalama adımlarından oluşmaktadır. Her bir adım aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

4.2.1. Blok sınıflandırma

Bir pikselin 1 bit ile damgalanması durumunda pikselde oluşan ortalama bozunum, Denklem (2.12) ve Denklem (2.13) kullanılarak,

$$D_1(e) = E[(F^w(i, j) - F(i, j))^2] = E[(e + b)^2] = e^2 + e + 0.5 \quad (4.1)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Öngörü hatasının 2 bit ile damgalanması durumunda damgalı piksel değeri, $b_1, b_2 \in \{0, 1\}$ olmak üzere, Denklem 2.13'ten

$$F^w(i, j) = \hat{F}(i, j) + 2(2H(i, j) + b_1) + b_2 = F(i, j) + 3H(i, j) + 2b_1 + b_2 \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda bir pikselde oluşan ortalama bozunum,

$$D_2(e) = 0.25 \sum_{b_1, b_2 \in \{0, 1\}} (3e + 2b_1 + b_2)^2 = 9e^2 + 9e + 3.5 \quad (4.3)$$

olacaktır. Denklem (4.1) ve Denklem (4.3)'ten $D_2(e) > D_1(e)$ 'dir. Yani aynı öngörü hatası için bir pikseli 2 bit ile damgalama, 1 bit ile damgalamaya göre daha fazla bozunum oluşturmaktadır. Ancak $|e_1|, |e_2|$ 'ye göre yeterince büyük ise $D_1(e_1) > D_2(e_2)$ 'dir. Diğer bir deyişle öngörü hatası küçük olan bir pikseli iki bit ile damgalamak, öngörü hatası yeterince büyük olan bir pikseli 1 bit ile damgalamaya göre daha az bozunuma neden olmaktadır.

Tüm piksellerin aynı şekilde damgalanmayıp öngörü hatasının aldığı değere göre farklı sayıda bit ile damgalanmasına *uyarlanır damgalama* denir. Uyarlanır damgalamada hangi piksellerin 1 bit hangi piksellerin 2 bit ile damgalanacağını

belirlemek amacıyla hareket dengelenmiş zamansal standart sapma (HDZSS) kullanılacaktır. B_{kd} bloğunun hareket dengelenmiş öngörüsü \hat{B}_{kd} olmak üzere bloğa ait HDZSS (BSS_{kd}),

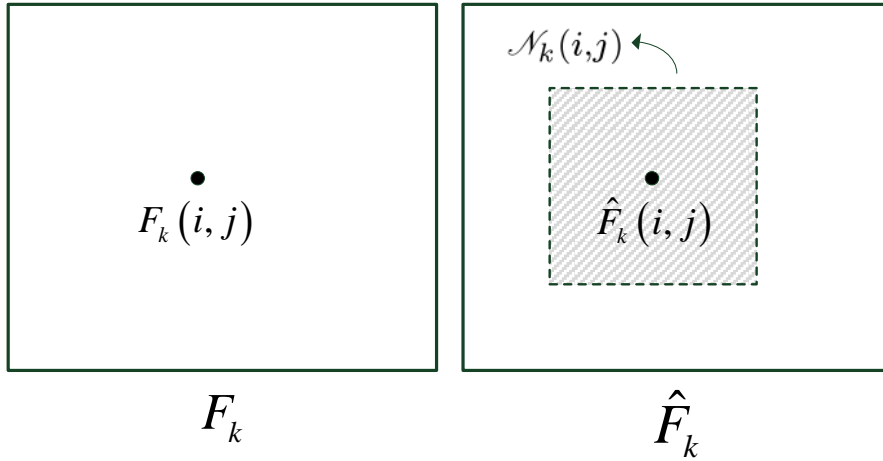
$$BSS_{kd} = \sqrt{\frac{1}{b \times b} \sum_i \sum_j [B_{kd}(i, j) - \hat{B}_{kd}(i, j)]^2} \quad (4.4)$$

eşitliğinden hesaplanır. Önerilen yöntemde tüm blokların HDZSS'si hesaplanır. Daha sonra bloklar HDZSS'sine göre düzgün ve düzgün olmayan şekilde sınıflandırılır. Δ_{tae} eşik değeri olmak üzere, HDZSS'si Δ_{tae} 'den küçük olan bloklar düzgün; diğer bloklar ise düzgün olmayan olarak adlandırılır. Düzgün bloklardaki pikseller düşük öngörü hatasına sahip olup 2 bit ile damgalamaya aday piksellerdir. Diğer bölgedeki pikseller ise yüksek öngörü hatasına sahip olduğundan 1 bit ile damgalamaya aday piksellerdir.

Damga çözücü, piksellere kaç bit damga eklendiğini belirlemelidir. Bu amaçla $(M/b) \times (N/b)$ boyutlarında iki boyutlu bir vektör harita kullanılabilir. Haritada 2 bit ile damgalanan bloklar 1, 1 bit ile damgalanan bloklar 0 ile belirtilir. Harita (BTH: Blok tipi haritası) küçük boyutlu olup video çerçevelerine yan bilgi olarak eklenebilir ve damga çözücü, damgalı çerçevelerden haritayı oluşturabilir.

4.2.2. Piksel seçme

Önerilen yöntemde, ötelenen piksel sayısı videoda oluşan bozunumu olumsuz etkilemektedir. O halde damga ekleme esnasında ötelenecek piksel sayısı azaltılabilir ise video kalitesinde ciddi derecede iyileşme oluşabilir. Piksel seçmedeki amaç ötelenecek piksel miktarını azaltmaktır. Bu amaçla HDZYSS (hareket dengelemeli zamansal yerel standart sapma) kullanılacaktır. Bir çerçevede (i, j) konumundaki bir piksel için HDZYSS, karşılık gelen öngörü çerçevesinde merkezi (i, j) olan bir komşuluktaki piksellerden hesaplanan standart sapmadır. F_k 'da (i, j) konumundaki bir pikselin $YSS_k(i, j)$ ile belirtilen HDZYSS



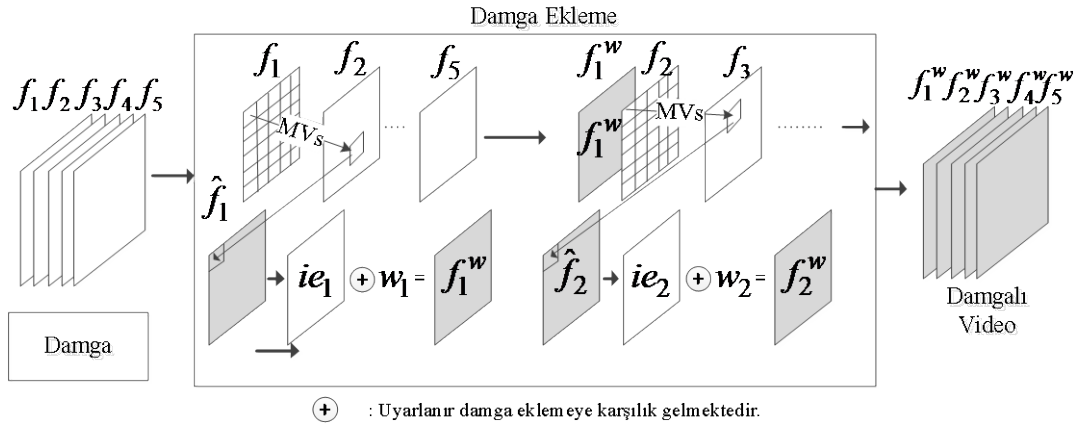
Şekil 4.1. $F_k(i, j)$ pikselinin hareket dengelenmiş komşuluğunun $N_k(i, j)$ gösterimi

$$YSS_k(i, j) = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{(p,r) \in N_k(i,j)} [\hat{F}_k(p, r) - NYO_k(i, j)]^2} \quad (4.5)$$

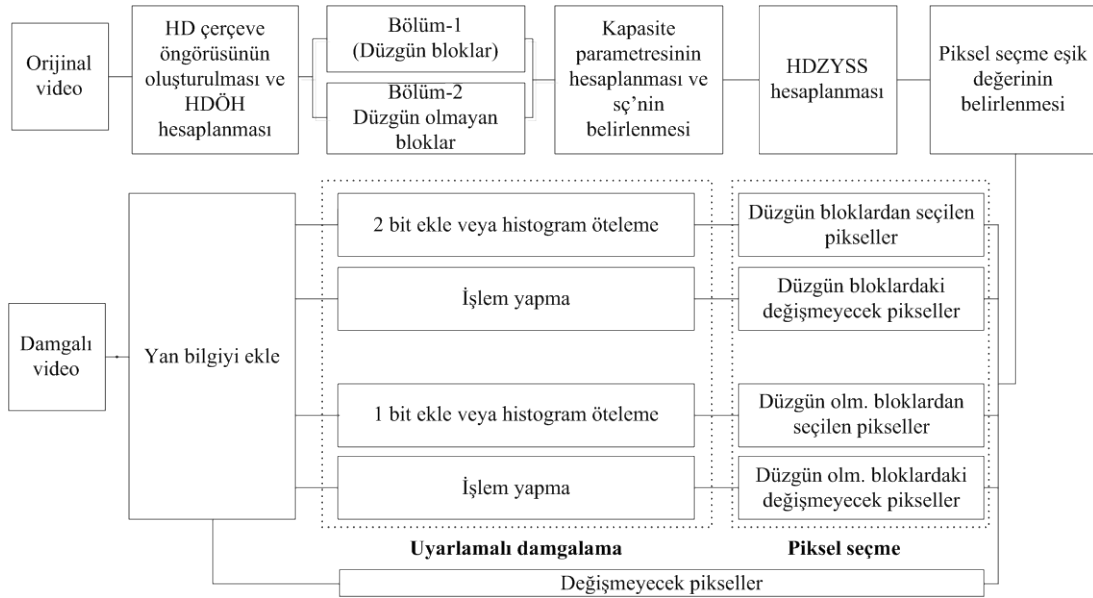
eşitliğinden hesaplanır. Burada $N_k(i, j)$, Şekil 4.1’de gösterildiği gibi \hat{F}_k ’da merkezi (i, j) olan bir komşuluktur, N_s komşuluktaki piksel sayısıdır ve $NYO_k(i, j)$ ise $N_k(i, j)$ ’deki piksellerin yerel ortalaması olup

$$NYO_k(i, j) = \frac{1}{N_s} \sum_{(i,j) \in N_k(i,j)} \hat{F}_k(i, j) \quad (4.6)$$

denklemden hesaplanır. Tüm piksellerin HDZYSS’si hesaplanır. HDZYSS değeri, Δ_{tps} eşik değerinden küçük olan pikseller damga ekleme veya öteleme için kullanılır, bu şartı sağlamayan piksellerin değerinde değişiklik yapılmaz. Damga eklemede kullanılan HDZYSS damga çıkarma esnasında da belirlenebildiğinden, damga çözücü hangi piksellerin seçildiğini belirleyebilmektedir. Detaylar Kısım 4.2.3’te verilmiştir.



Şekil 4.2. Önerilen yöntemde damga eklemeye ait yapı. Damgalama ilk çerçeven son çerçeveye doğru gerçekleştirilir.



Şekil 4.3. Önerilen yöntemin uyarlanı r damga eklemeye diyagramı

4.2.3. Damga eklemeye

Damga eklemeye karşılık gelen yapı ve blok diyagramı Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Blok eşleşme yöntemi kullanılarak çerçeveler öngörülür ve blokların HDÖ hatası oluşturulur. Bloklar Δ_{aet} eşik değeriyle dü z g ü n ve dü z g ü n olmayan şeklinde sınıflandırılır. Verilen bir damga için tüm çerçeveler için geçerli olan kapasite parametresi ve damgalanacak son çerçeve belirlenir. Daha sonra piksellerinin HDZYSS değeri hesaplanarak piksel seçme eşik değeri Δ_{pst} yardımıyla damgalanacak ve ötelenecek pikseller belirlenir. Blok tipine ve pikselin seçilip

seçilmediğine bağlı olarak uyarlanır damgalama gerçekleştirilir. Son olarak çerçevelere yan bilgiler eklenerek damgalı video elde edilir. Yukarıda özetlenen işlemler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır. Tartışmada video dizisindeki toplam çerçeve sayısının n çerçeve boyutunun $M \times N$ olduğu ve eklenmek istenen damga biti sayısı N_c , kapasite parametresinin T_{cp} ile gösterildiği varsayılmıştır.

Aşağıdaki işlemler ilk çerçeveden başlanarak uygulanıp damgalı video elde edilir.

1. F_k 'nın hareket dengelenmiş öngörüsü \hat{F}_k 'yi oluştur.
2. $H_k = F_k - \hat{F}_k$ ile verilen hareket dengelenmiş öngörü hatası (HDÖH) çerçevesini belirle ve histogramını hesapla.
3. Denklem 14'ten blokların HDZSS'sini hesapla. F_k 'daki blokları aşağıda belirtildiği gibi iki sınıfa ayır:

- Düzgün bloklar kümesi: $B_{fk}(d) = \{B_{kd} : BSS_{kd} < \Delta_{aet}\}$
- Düzgün olmayan bloklar kümesi: $B_{rk}(d) = \{B_{kd} : BSS_{kd} \geq \Delta_{aet}\}$

4. Kapasite parametresinin hesaplanması: $t' = \lfloor T_{cp}/3 \rfloor$ olmak üzere F_k 'daki bir pikseli aşağıda tanımlanan kümelerden birine dahil et.

- B_{fk} bölgesindeki genişletilebilen pikseller kümesi:

$$E_{Bf}(k, T_{cp}) = \{(i, j) : -t \leq H_k(i, j) < -t', 0 \leq F_k(i, j) + 3|H_k(i, j)| \leq 252\}$$

- B_{fk} bölgesindeki ötelenebilen pikseller kümesi:

$$S_{Bf}(k, T_{cp}) = \left\{ \begin{array}{l} \{(i, j) : H_k(i, j) \geq t', F_k(i, j) \leq 255 - 3t'\} \cup \\ \{(i, j) : H_k(i, j) < -t', F_k(i, j) \geq 3t'\} \end{array} \right\}$$

- B_{rk} bölgesindeki genişletilebilen pikseller kümesi:

$$E_{Br}(k, T_{cp}) = \{(i, j): -T_{cp} \leq H_k(i, j) < T_{cp}, 0 \leq F_k(i, j) + [H_k(i, j)] \leq 254\}$$

– B_{rk} bölgesindeki ötelenebilen pikseller kümesi:

$$S_{Br}(k, T_{cp}) = \left\{ \{(i, j): H_k(i, j) \geq T_{cp}, F_k(i, j) \leq 255 - T_{cp}\} \cup \{(i, j): H_k(i, j) < -T_{cp}, F_k(i, j) \geq T_{cp}\} \right\}$$

– Taşma yaşanan pikseller kümesi:

$$O(k, T_{cp}) = \left(B_{fk} - E_{Bf}(k, T_{cp}) - S_{Bf}(k, T_{cp}) \right) \cup \left(B_{rk} - E_{Br}(k, T_{cp}) - S_{Br}(k, T_{cp}) \right)$$

Herhangi bir piksel yukarıdaki kümelerden sadece birine dâhil olup $F_k = E_{Bf}(k, T_{cp}) \cup E_{Br}(k, T_{cp}) \cup S_{Bf}(k, T_{cp}) \cup S_{Br}(k, T_{cp}) \cup O(k, T_{cp})$ 'dir.

$E_{Bf}(k, T_{cp})$ 'deki pikseller taşma oluşmadan 2 bit ile, $E_{Br}(k, T_{cp})$ 'deki kümesindeki pikseller ise 1 bit ile damgalanarak genişletilebilmektedir. $S_{Bf}(k, T_{cp}) \cup S_{Br}(k, T_{cp})$ kümesindeki pikseller ise taşma oluşmadan ötelenebilmektedir. $O(k, T_{cp})$ kümesindeki pikseller ise ne genişletebilmekte ne de ötelenebilmektedir.

F_k 'ya eklenebilecek toplam bilgi miktarı $C_k = 2|E_{Bf}(k, T_{cp})| + |E_{Br}(k, T_{cp})|$ 'dir. F_k 'ya ait yan bilginin ikili tabanda gösteriliminin YB_k dizisinde saklandığı varsayılırsa, F_k 'ya eklenebilecek damga miktarı $|P_k| = C_k - |YB_k|$ 'dır. Bu durumda videoya eklenebilecek toplam damga miktarı $C = \sum_{k=1}^n |P_k|$ olacaktır. Videoya eklenmesi gereken toplam damga biti sayısı N_c olduğundan, $T_{cp} \in \{1, 2, \dots, 255\}$ olmak üzere,

$$\sum_{k=1}^{S\check{C}} |P_k| \geq |N_c| \quad (4.7)$$

şartını sağlayan en küçük T_{cp} kapasite parametresi olarak alınır. Denklem 4.7'de $S\check{C} \in \{1, 2, \dots, n\}$ damgalanacak son çerçeveyi göstermektedir. $T_{cp} = 255$ ve $S\check{C} = n$

iken Denklem 4.7 sağlanmıyorsa verilen damgayı videoya eklemek mümkün değildir.

5. Piksel seçme eşik değerinin belirlenmesi: $E_{Bf}(k, T_{cp})$ ve $E_{Br}(k, T_{cp})$ kümelerindeki düşük standart sapmalı genişletilebilen pikseller kümelerini $\Delta_{pst} \in \{0,1,2, \dots, 255\}$ olmak üzere aşağıdaki şekilde tanımlayalım:

$$E_{Bf}(k, T_{cp}, \Delta_{pst}) = \{(i, j) \in E_{Bf}(k, T_{cp}) : YSS(i, j) \leq \Delta_{pst}\} \quad (4.8)$$

$$E_{Br}(k, T_{cp}, \Delta_{pst}) = \{(i, j) \in E_{Br}(k, T_{cp}) : YSS_k(i, j) \leq \Delta_{pst}\} \quad (4.9)$$

$E_{Bf}(k, T_{cp}, \Delta_{tps})$ kümesindeki pikseller 2 bit, $E_{Br}(k, T_{cp}, \Delta_{tps})$ kümelerindeki kümesindeki pikseller 1 bit ile damgalandığından, belirlenen T_{cp} ve Δ_{pst} seçilen için videoya eklenebilecek toplam bilgi miktarı

$$C(T_{cp}, \Delta_{pst}) = \sum_{k=1}^{LF} 2|E_{Bf}(k, T_{cp}, \Delta_{pst})| + |E_{Br}(k, T_{cp}, \Delta_{pst})| \quad (4.10)$$

olacaktır. Ancak videoya eklenecek bilgi miktarı N_c olduğundan, $C(T_{cp}, \Delta_{pst}) \geq |N_c|$ şartını sağlayan en küçük Δ_{pst} piksel seçme eşiği olarak kabul edilir. $\Delta_{pst} = 255$ çıkması durumunda $E_{Bf}(k, T_{cp}, \Delta_{pst})$ ve $E_{Br}(k, T_{cp}, \Delta_{pst})$ kümelerindeki piksellerin tümünün damgalamada kullanılacağına dikkat ediniz. Diğer bir deyişle Şekil 2'deki piksel seçme adımı ihmal edilmiş olur.

6. Piksel seçme ve uyarlanır damgalama: Aşağıdaki işlemler belirli bir sırada uygulanarak N_c 'den $|P_k|$ kadar bit F_k 'ya damgalanır.

a) $YSS(i, j) \leq \Delta_{pst}$ ve $(i, j) \notin \{O(k, T_{cp})\}$ ise,

– $(i, j) \in E_{Bf}(k, T_{cp})$ ise piksele 2 bit ($b \in \{0,1,2,3\}$) ekle.

$$F_k^w(i, j) = F_k(i, j) + 3[H_k(i, j)] + b \quad (4.11)$$

– $(i, j) \in S_{Bf}(k, T_{cp})$ ise piksel değerini ötele.

$$F_k^w(i, j) = \begin{cases} F_k(i, j) + 3\lfloor T_{cp}/3 \rfloor, & H_k(i, j) \geq \lfloor T_{cp}/3 \rfloor \\ F_k(i, j) - 3\lfloor T_{cp}/3 \rfloor, & H_k(i, j) < -\lfloor T_{cp}/3 \rfloor \end{cases} \quad (4.12)$$

– $(i, j) \in E_{Br}(k, T_{cp})$ ise piksele 1 bit ($b \in \{0,1\}$) ekle.

$$F_k^w(i, j) = F_k(i, j) + \lfloor H_k(i, j) \rfloor + b \quad (4.13)$$

– $(i, j) \in S_{Br}(k, T_{cp})$ ise piksel değerini ötele.

$$F_k^w(i, j) = \begin{cases} F_k(i, j) + T_{cp}, & H_k(i, j) \geq T_{cp} \\ F_k(i, j) - T_{cp}, & H_k(i, j) < -T_{cp} \end{cases} \quad (4.14)$$

b) Aksi takdirde ($YSS_k(i, j) > \Delta_{pst}$ veya $(i, j) \in \{O(k, T_{cp})\}$),

$$F_k^w(i, j) = F_k(i, j) \text{ dir.}$$

7. Yan bilgilerin eklenmesi: Orijinal k çerçevenin ilk pikselinden itibaren $|YB_k|$ (Kısım 3.5'de verilen) kadar pikselinin en düşük anlamlı bitlerini S_{LSB} dizisinde sakla. S_{LSB} dizisindeki bitleri, adım 6'da damgalamanın sona erdiği pikselden (Kısım 3.5'de verilen LPP_k değişkenidir) sonraki piksellere adım 6'daki gibi ekle. Ardından YB_k dizisinin bitlerini, k çerçevenin ilk pikselinden itibaren YB_k kadar pikselin en düşük anlamlı bitleri ile değiştir. Bu aşamanın sonucunda damgalanmış k . çerçeve elde edilmiş olur.

8. $k = k + 1$ yap. $k < S\mathcal{C}$ olduğu sürece adım 6 ve 7'yi k . çerçeve için tekrarla. Bu aşamanın sonucunda damgalı video elde edilmiş olur.

Tablo 4.1. Yan bilgileri temsil edebilmek için gerekli bit sayısı

$bsç$	Δ_{pst}	T_{cp}	LPP_k	$u = |O(k, T_{cp})|$	Taşma Konumları	BTH	MVs
1 bit	8 bit	8 bit	$|\log_2(MN)|$ bit	$|\log_2(MN)|$ bit	$u|\log_2(MN)|$ bit	$\frac{MN}{b^2}$ bit	$2\frac{MN}{b^2} (\lceil \log_2(s^2) \rceil + 1)$ bit

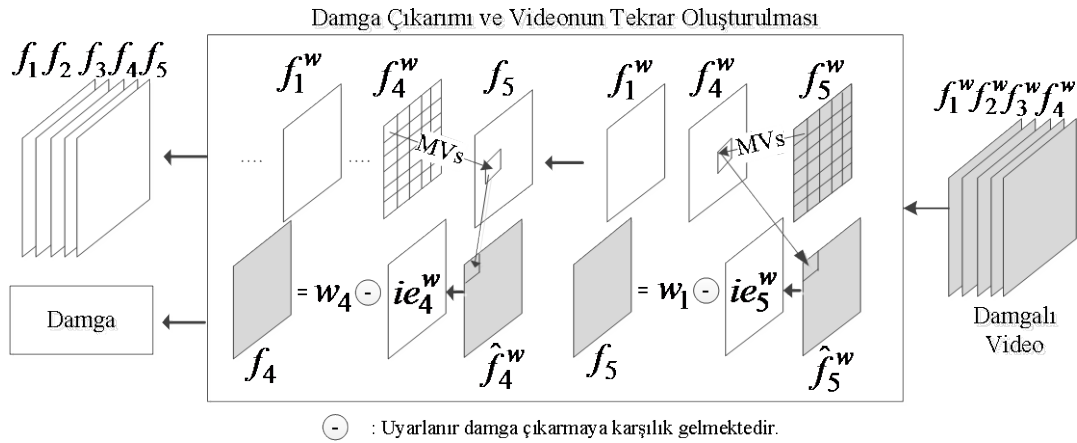
4.2.4. Optimal zamansal uyarlanırlar ekleme eşik değerinin belirlenmesi

Zamansal uyarlanırlar ekleme eşik değeri Δ_{tae} video içeriğine bağlıdır. Bu nedenle, verilen bir kapasite için, her video farklı Δ_{tae} değerine sahiptir. Bir video için çoğu durumda Δ_{tae} yükseldikçe, video kalitesinde düşme yaşanmaktadır. Bu nedenle bir video için optimum zamansal uyarlanırlar ekleme eşik değerini bulmak amacıyla, görsel video kalitesi (PSNR) Δ_{tae} 'nin fonksiyonu olarak $[0, r_{max}]$ aralığında çizdirilir. PSNR'ı en büyükleyen Δ_{tae} değeri zamansal uyarlanırlar ekleme eşik değeri olarak alınır. Yapılan deneysel çalışmalarda $r_{max} = 15$ alınmıştır.

4.2.5. Yan bilginin oluşturulması

Önerilen yöntemde yan bilgiler, damga ekleme esnasında orijinal çerçevelere eklenir ve damga çıkarma esnasında damgalı çerçevelerden geri oluşturulur. Bu nedenle orijinal çerçevelerin belirli bir kısmı yan bilgileri saklamak amacıyla kullanılmaktadır.

Bir çerçeve için yan bilgiyi oluşturan bileşenler Tablo 4.1'deki gibidir. Çerçevenin damgalanan son çerçeve olup olmadığını belirtmek amacıyla 1 bitlik bir bayrak ($bsç$), piksel seçme eşik değeri Δ_{pst} , kapasite parametresi T_{cp} , çerçevelere ek bilginin eklenmeye başladığı piksel konumu LPP_k , taşmaya neden olan piksellerin sayısı ve konumları, blokların hangi sınıfa ait olduğunu belirten ikili bir harita BTH ve bloklara ait hareket vektörleri (MVs) yan bilgiyi oluşturmaktadır.



Şekil 4.4. Damga çıkartma esnasında damga eklemede kullanılan aynı öngörü hatasını elde etmek amacıyla gerçekleştirilen damgalama yapısı. Damga ekleme ilk çerçeveden son çerçeveye doğru yapılırken, damga çıkartımı son çerçeveden ilk çerçeveye doğru gerçekleştirilir.

Δ_{pst} ve T_{cp} , $[0,255]$ aralığında değer aldığından her biri 8 bit ile temsil edilir. Çerçeve boyutu $M \times N$ olmak üzere herhangi bir pikselin konumu $\log_2[MN]$ bit ile temsil edilmektedir. Bu yüzden LPP_k 'yi saklamak için gerekli bit uzunluğu $\log_2[MN]$ bit'tir. Taşmaya sebep olan piksel sayısı $|O(k, T_{cp})|$, $\log_2[MN]$ bit ile temsil edilir. Taşmaya sebep olan piksel konumlarını tutmak için gerekli bit uzunluğu $\log_2[MN] \times |O(k, T_{cp})|$ 'dir. Hareket kestiriminde kullanılan blok boyutunun $b \times b$ olduğu farz edilirse, BTH bilgisinin temsili için gerekli bit uzunluğu MN/b^2 bit'dir. Bloklara ait hareket vektörünün yatay ve dikey bileşenlerini ikili temsili için gerekli bit sayısı hareket kestirimindeki arama penceresinin boyutuna bağlıdır. Arama penceresi boyutunun $s \times s$ olduğu varsayılırsa MVs 'ye ait her bir bileşen için minimum bit sayısı $\log_2[s^2] + 1$ 'dir. Buradaki ilave 1 bit bileşen işaretini belirtmek amacıyla kullanılmaktadır. Hareket vektörlerinin tümünü temsil etmek için gerekli bit sayısı $2(MN/b^2) \times (\log_2[s^2] + 1)$ 'dir.

4.2.6. Damga Çıkartımı

Damga çıkartımı ve original videonun tekrar oluşturulması adımına ait yapı Şekil 4.4'te verilmiştir. Damga çıkartımının gerçekleştirilebilmesi için damga eklemede kullanılan çerçevelerin öngörülerinin aynı şekilde geri elde edilebilmesi gereklidir. Bu amaçla hareket vektörlerinden yararlanılır ve damga çıkartımı son çerçeveden ilk çerçeveye doğru gerçekleştirilir.

Damga çıkartımı ve orijinal videonun geri elde edilmesi için aşağıdaki adımlar $bsç$ parametresinin 1 olduğu çerçeveden geriye doğru gerçekleştirilir.

1. Yan bilgilerin Elde Edilmesi: $bsç = 1$ olan k . çerçeveyi son çerçeve ($SÇ = k$) olarak belirle. F_k^w , nin ilk $|YB_k|$ pikselinin en düşük anlamlı bitlerinden, Δ_{pst} , T_{cp} , LPP_k $|O(k, T_{cp})|$, $O(k, T_{cp})$ kümesindeki piksel konumlarını, BTH ve hareket vektörleri MVs 'yi belirle.

2. Hareket vektörlerini (MVs) kullanarak F_k^w çerçevesinin öngörüsü \hat{F}_k^w 'yi, hesapla. ($F_k^w = \hat{F}_k$)

3. $H_k^w = F_k^w - \hat{F}_k^w$ ile verilen damgalı HDÖH hesapla.

4. Düzgün ve düzgün olmayan blok tiplerini BTM'den belirle.

5. F_k^w 'ya ait piksellerin $YSS_k(i, j)$ 'sini hesapla.

6. Aşağıda verilen adımları LPP_k pikselinden itibaren uygulayarak damga bitlerini, orijinal videoyu oluştur ve çıkarılan bitler ile LSB_k 'nın bitlerini belirle. $T'_{cp} = \lfloor T_{cp}/3 \rfloor$ için,

a) $YSS_k(i, j) \leq \Delta_{pst}$ ve $(i, j) \notin \{O(k, T_{cp})\}$ ise

– $(i, j) \in B_{fk}$ ve $H_k^w(i, j) \in [-4T'_{cp}, 4T'_{cp})$ ise pikselden 2 bit çıkart. Eklenen damgayı,

$$b = \lfloor H_k^w(i, j) \rfloor - 4 \left\lfloor \frac{H_k^w(i, j)}{4} \right\rfloor \quad (4.15)$$

ile çıkartılır.Original piksel değerini,

$$F_k(i, j) = F_k^w(i, j) - 3 \left\lfloor \frac{H_k^w(i, j)}{4} \right\rfloor - b \quad (4.16)$$

denklemleri ile belirlenir.

- $(i, j) \in B_{fk}$ ve $H_k^w(i, j) \in [255, -4T'_{cp}] \cup [4T'_{cp}, 255]$ ise orijinal piksel değeri

$$F_k(i, j) = \begin{cases} F_k^w(i, j) - 3T'_{cp}, & H_k^w(i, j) \geq 4T'_{cp} \\ F_k^w(i, j) + 3T'_{cp}, & H_k^w(i, j) < -4T'_{cp} \end{cases} \quad (4.17)$$

ile hesaplanır.

- $(i, j) \in B_{rk}$ ve $H_k^w(i, j) \in [-2T_{cp}, 2T_{cp}]$ ise pikselden 1 bit çıkart. Eklenen damga

$$b = H_k^w(i, j) - 2 \left\lfloor \frac{H_k^w(i, j)}{2} \right\rfloor \quad (4.18)$$

ile orijinal piksel değeri

$$F_k(i, j) = F_k^w(i, j) - \left\lfloor \frac{H_k^w(i, j)}{2} \right\rfloor - b \quad (4.19)$$

ile geri elde edilir.

- $(i, j) \in B_{rk}$ ve $H_k^w(i, j) \in [255, -2T_{cp}] \cup [2T_{cp}, 255]$ ise orijinal piksel değeri

$$F_k(i, j) = \begin{cases} F_k^w(i, j) - T_{cp}, & H_k^w(i, j) \geq 2T_{cp} \\ F_k^w(i, j) + T_{cp}, & H_k^w(i, j) < -2T_{cp} \end{cases} \quad (4.20)$$

ile belirlenir.



(a) Bus (b) Flower (c) Football (d) Harbour (e) Ice (f) Paris

Şekil 4.5. Simülasyon çalışmalarında kullanılmış test videolarına ait ilk çerçeveler

b) Aksi takdirde, $(YSS_k(i, j) > \Delta_{pst}$ veya $(i, j) \in \{O(k, T_{cp})\}$), $F_k(i, j) = F_k^w(i, j)$

7) F_k^w 'nin ilk $|YB_k|$ pikselinin en düşük anlamlı bitlerini LSB_k dizisinin bitleri ile değiştir.

8) F_k^w 'nin ilk pikselinden LPP_k piksel konumuna kadar adım 6'daki işlemleri uygulayarak P_k ve F_k 'yi oluştur.

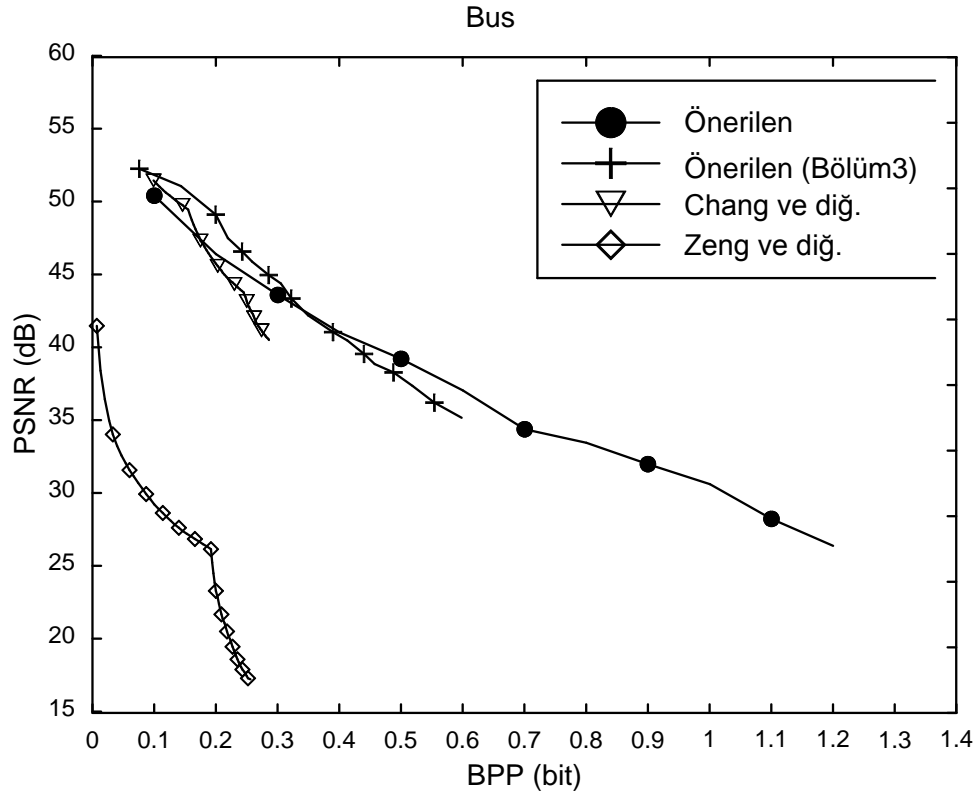
9) $k = k - 1$ olarak belirle. $k > 0$ olduğu sürece adım 1'den 8'e kadar olan işlemleri F_k^w 'ya uygula. P_k dizilerini art arda ekleyerek damgayı oluştur.

4.3. Deneysel Sonuçlar

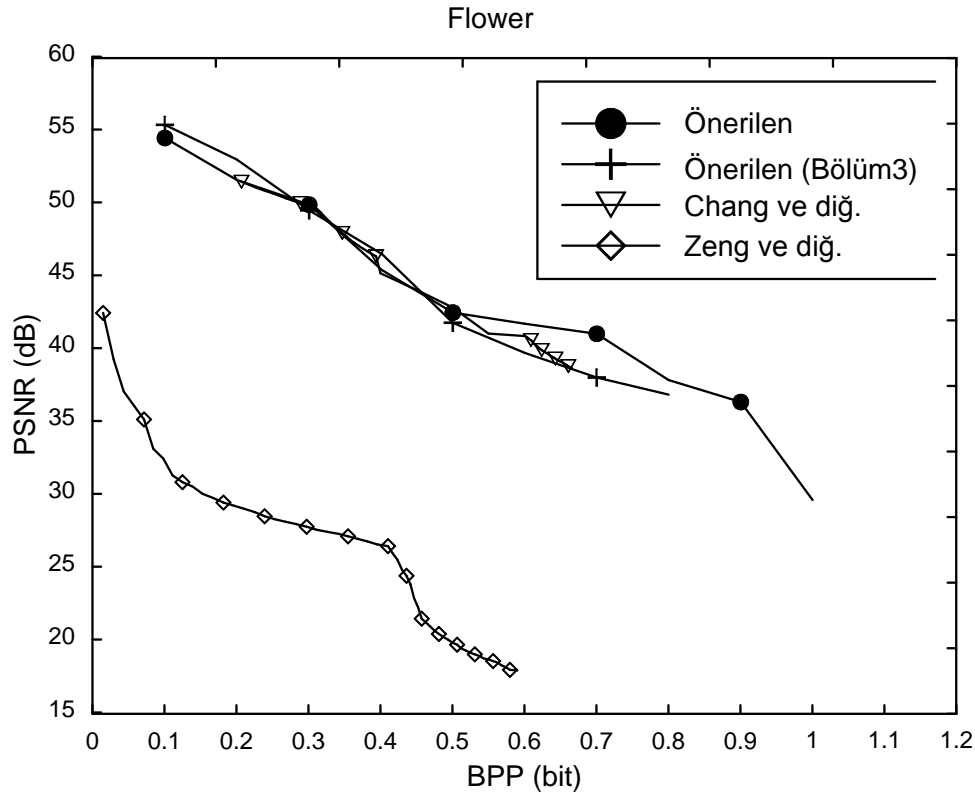
Önerilen yöntemin performansı, Şekil 4.5'de birer çerçeveleri gösterilen test videoları için incelenmiştir. Videolar CIF formatında olup saniyedeki çerçeve sayısı 15'dir. Simülasyonlarda 30 sn. süreli test videoları kullanılmıştır. Yöntemler gerçekleştirilirken hareket kestirimi amacıyla blok ve arama penceresi boyutları sırasıyla 16×16 ve 64×64 seçilmiştir. Önerilen yöntemde piksel seçmede kullanılan komşuluk 3×3 piksel olarak seçilmiştir. Test videoları seçilirken hareket karmaşıklıklarının ve histogramlarının farklı olmasına dikkat edilmiştir. Bus ve Football videoları hızlı ve karmaşık hareketlere sahip iken, Flower, Harbour ve Ice dizilerinde orta düzeyde hareket mevcuttur. Paris dizisinde düşük düzeyde hareket bulunmaktadır. Bus, Paris ve Football dizilerinin histogramı düzgün dağılıma yakınken, harbour ve flower dizilerinin beyaz ve orta piksel değerleri etrafında yoğunluğa sahiptir. Öte yandan Ice dizisinin histogramı genelde beyaz ve siyah piksel değerleri civarında bileşenler içermektedir. Deneysel çalışmalarda rastgele

oluşturulan bit dizileri damga olarak kullanılmıştır. Çeşitli yöntemlerin performanslarını karşılaştırmak amacıyla piksel başına damga miktarı (BPP) ve tepe işaret-gürültü-oranı (PSNR) kullanılmıştır.

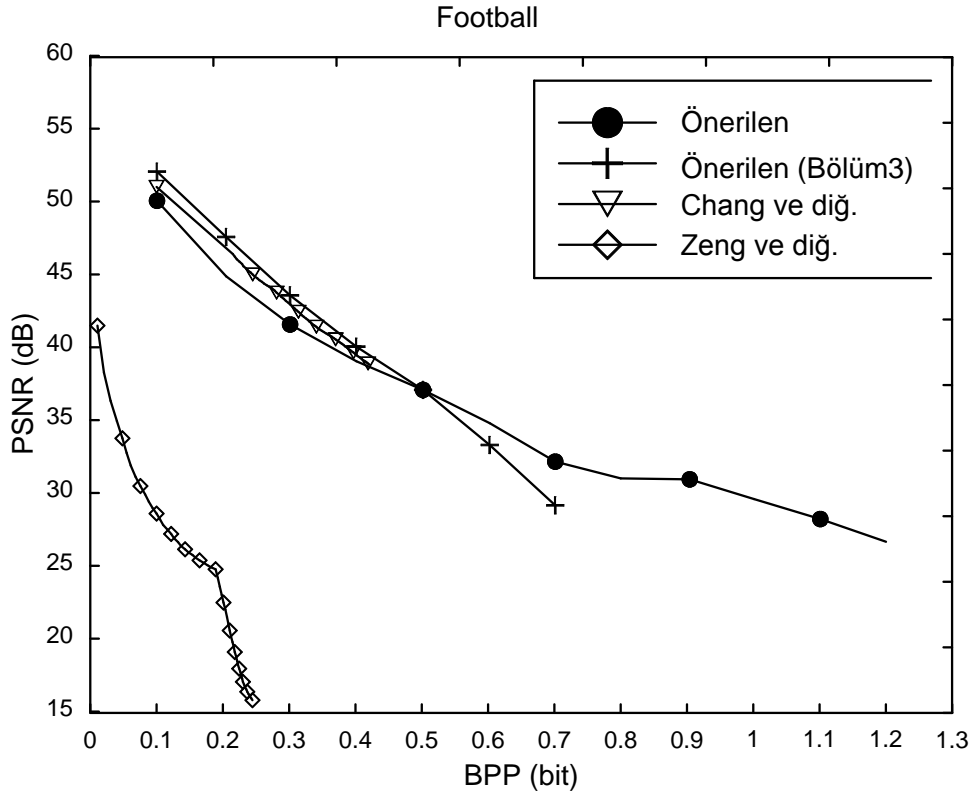
Önerilen yöntem, Kısım 2’de tanıtılan HDÖ’ye dayalı yöntemlerle verilen bir kapasite için orijinal videoda oluşan bozunum bakımından karşılaştırılmıştır. Kapasitenin, yan bilgi hariç video çerçevelerine eklenen toplam bit sayısına eşit olduğuna dikkat ediniz. Zeng ve ark.’a ait yöntemde çerçevelerin hareket dengelemeli öngörüsü tespit edilerek çerçeve bazlı bir damgalama uygulanmıştır [33]. Damgayı geri elde etmek için, hareket vektörlerine, çerçevelere ait histogramların maksimum ve minimum noktalarına ve taşma konumlarını belirlemek üzere bir sınır haritasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yöntemin görsel kalitesi iyi değildir. Chung ve ark.’a ait yöntemde blok temelli bir damgalama kullanılmıştır [34]. Hareket dengelenmiş çerçevelere ait her blok ayrı bir görüntü olarak ele alınıp, histogram değiştirme yöntemi ile damgalanmıştır. Damgayı ve orijinal videoyu geri elde etmek için her bloğa ait histogramın maksimum ve minimum noktalarının bilinmesine, hareket vektörlerine ve taşma konumlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Karşılaştırma amacı ile tanıtılan yöntemlerinin kapasitesi, yöntemler videoya birden fazla uygulanarak (çok seviyeli damgalama) arttırılabilir. Ancak seviye arttıkça kapasitedeki artış doğrusal değildir.



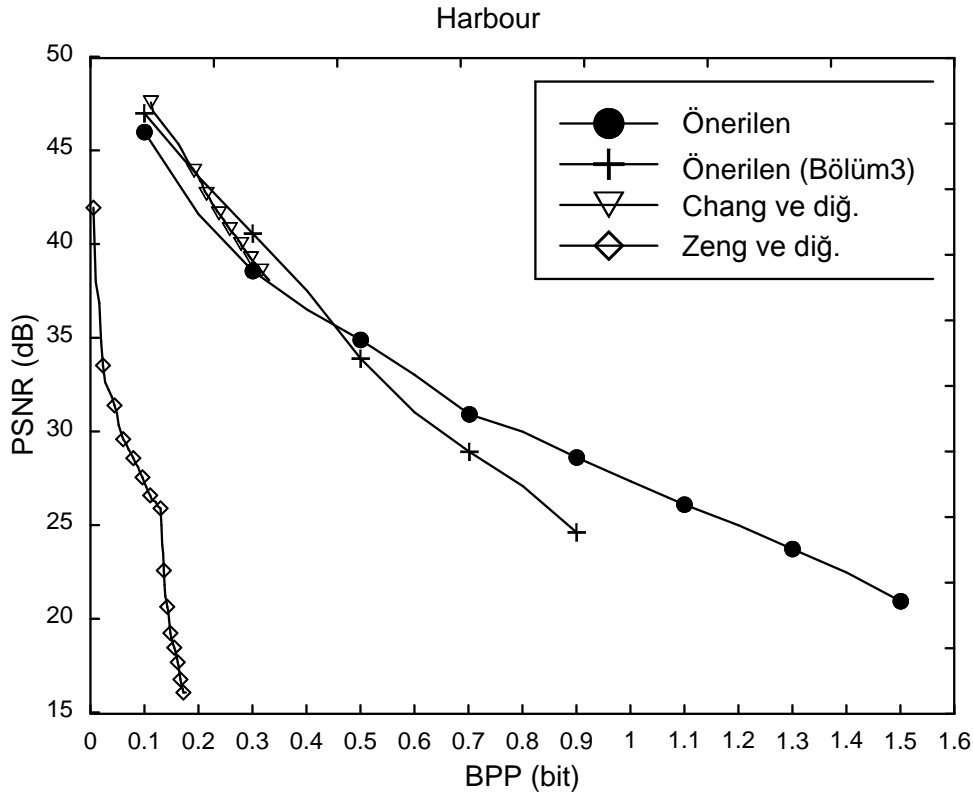
Şekil 4.6. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Bus dizisi için performansı



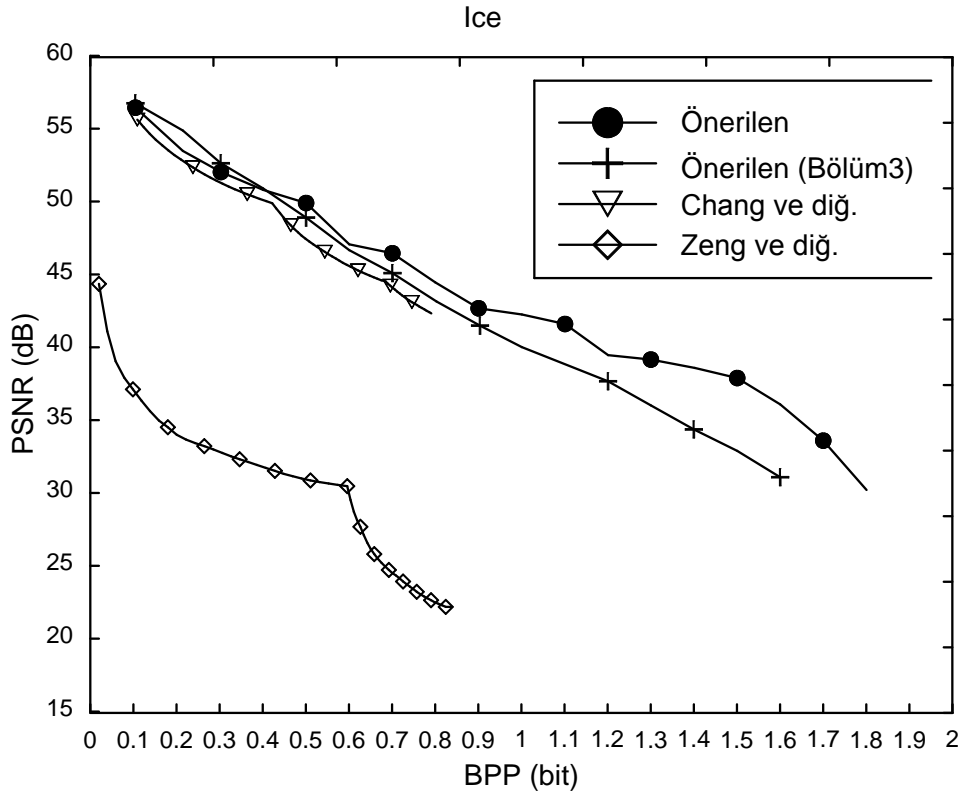
Şekil 4.7. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Flower dizisi için performansı



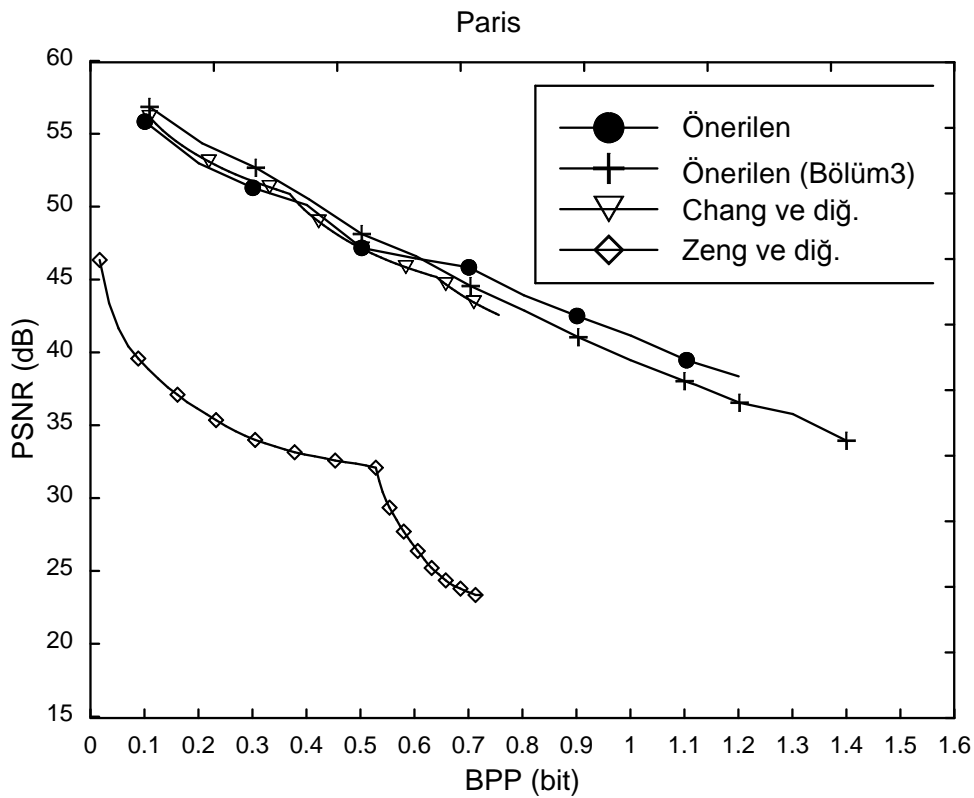
Şekil 4.8. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Football dizisi için performansı



Şekil 4.9. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Harbour dizisi için performansı



Şekil 4.10. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Ice dizisi için performansı



Şekil 4.11. Mevcut ve önerilen yöntemlerin Paris dizisi için performansı

Önerilen yöntem ile karşılaştırılan yöntemlerde çerçeve damgalamaya video dizisindeki herhangi bir çerçevenin saf kapasitesi 0 oluncaya kadar devam edilmiştir. Zeng ve ark.'ın yönteminde Bus, Flower, Football, Harbour, Ice ve Paris videoları için sırasıyla 2, 3, 2, 3, 3, 3 seviyelerine kadar damgalama uygulanabilmiştir. Bu seviyelerden sonra bir veya daha fazla çerçeveye ait yan bilgi sayısı, çerçevenin saf kapasitesine geçtiğinden damgalamaya devam edilememiştir. Aynı nedenden dolayı Chung ve ark.'ın yönteminde yukarıda belirtilen diziler için sırasıyla 2, 3, 3, 4, 5, 3 seviyelerine kadar damgalama yapılabilmektedir.

Yöntemlerin saf kapasitedeki değişime göre sağladıkları görsel kalite 6 test videosu için Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.11'de verilmiştir. Eğrilerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir. İlk olarak, eklenen bilgi miktarı arttıkça yöntemlerin verdiği görsel video kalitesi düşmektedir. Ayrıca tüm yöntemlerde video kalitesinde ani düşüşler göze çarpmaktadır. Bunun nedeni gerekli saf kapasiteyi sağlayabilmek amacıyla karşılaştırılan yöntemlerde seviye sayısının, önerilen yöntemde ise kapasite parametresini artırılmasıdır. Örneğin Flower dizisi için Zeng ve ark.'ın yöntemi ile 0.35 bpp seviyesine kadar tek seviyeli damgalama yeterli olup, bu değerden sonra 2 seviyeli damgalamaya geçiş nedeni ile videonun görsel kalitesinde ani bir düşüş olmaktadır. Aynı dizi için benzer olay Chung ve ark.'ın yönteminde 0.44 bpp seviyesinde oluşmaktadır. Önerilen yöntemde kapasite parametresindeki artış çerçeveye eklenebilecek bilgi miktarını arttırmakla birlikte görsel video kalitesinin kötüleşmesine neden olmaktadır. Ancak bazı test dizileri için uyarlanırlık etkisi başladığında kapasite parametresindeki artışa rağmen görsel kalitede artış görülmektedir. Örneğin Football dizisinde 0.8 bpp'den sonra görsel kalitede ani bir artış vardır.

İkinci olarak karşılaştırma amacı için kullanılan yöntemler PEE tabanlı olup uyarlanırlık değildir. Önerilen yöntem uyarlanırlık olup piksel seçme algoritmasının da etkisi ile tüm test dizileri için karşılaştırılan yöntemlerden elde edilenlere göre daha yüksek kapasite ve daha iyi görsel kalite sağlamaktadır. Örneğin önerilen yöntem, Zeng ve ark.'ın yöntemi ile karşılaştırıldığında 0.7 bpp seviyesinde, Bus, Flower, Paris dizilerinde sırasıyla 1.2 db, 10 db, 5.2 db'lik görsel kalite kazancı sağlamıştır.

Ayrıca önerilen yöntem ile çok yüksek bpp seviyelerinde damgalama yapmak mümkündür. Şekillerden görüldüğü gibi karşılaştırılan yöntemler ile genellikle 0.8 bpp seviyesine kadar damgalama yapmak mümkün iken, önerilen yöntemle videoya bağlı olarak 1-2 bpp aralığında damgalama yapılabilmektedir.

Üçüncü olarak, tüm yöntemlerin performansı hareketin karmaşıklığından etkilenmektedir. Hareket karmaşıklaştıkça kapasite ve görsel kalite azalmaktadır. Ancak önerilen yöntem diğer yöntemlere göre hareketin karmaşıklığından daha az etkilenmektedir. Örneğin, Bus videosunda karşılaştırılan yöntemler, 0.3 bpp seviyesine kadar damgalanabilirken önerilen yöntemde yüksek seviyelere kadar damga uygulanabilmektedir.

Dördüncü olarak, yöntemlerin performansı çerçeve histogramlarının şeklinden etkilenmektedir. Düzgün dağılımlı bir histograma sahip videolarda yöntemler benzer sonuçlar üretmektedir. Örneğin, bu duruma uygun paris dizisinde 0.6 BPP ve Flower dizisinde 0.4 BPP seviyelerine kadar yöntemler benzer performans göstermektedir. Fakat çoğunlukla beyaz ve/veya siyah bölgelerde bileşenlere sahip histogramlı videolarda önerilen yöntem daha iyi görsel kalite vermektedir. Örneğin, Ice videosunda önerilen yöntemin performansı diğerlerininkinden üstündür.

Son olarak, Bölüm 3'teki önerilen yöntem ile bu bölümdeki önerilen yöntem karşılaştırıldığında, ilk yöntemin düşük kapasite seviyelerinde daha iyi görsel sonuç verdiği görülmektedir. Örneğin, Bus dizisinde önerilen ilk yöntem, 0.3 BPP seviyesine kadar diğer tüm yöntemlerden görsel kalite bakımından daha iyidir. Ancak bu bölümdeki önerilen yöntemde, damga miktarı arttıkça uyarlanırlar damgalamanın ve piksel seçme algoritmasının etkisi ile hem yüksek kapasitelere hem de daha iyi görsel kalite değerlerine ulaşılmaktadır. Örneğin Harbour dizisinde önerilen yöntem 1.5 BPP seviyelerine ulaşılabilirken önerilen ilk yöntem 0.9 BPP seviyelerinde kalmıştır. Aynı test dizisi için 0.8 BPP seviyesinde önerilen yöntem ilk yöntemden 3 dB kadar daha iyi görsel kalite üretmektedir. Benzer açıklamalar diğer tüm test dizileri için söylenebilir.

4.4. Tartışma

Bu bölümde hareket dengelenmiş öngörü hatalarının genişletilmesine dayalı bir uyarlamalı TVD yöntemi geliştirilmiştir. Hareket dengelenmiş çerçevelere ait bloklar, öngörü hatasının aldığı değerlere göre düzgün ve düzgün olmayan şekilde sınıflandırılmıştır. Tek bir damgalama stratejisi ile tüm blokları benzer şekilde damgalayan mevcut TVD yöntemlerinin aksine önerilen yöntem, düzgün ve düzgün olmayan blokları damgalamak için uyarlanır bir damgalama gerçekleştirmektedir. Ek olarak damgalı videoda yüksek bozunuma sebep olacak pikseller belirlenmesini sağlayan bir yöntem önerilmiştir ve bu pikseller damgalamada kullanılmayarak damgalı videoda oluşan bozunum azaltılmıştır. Verilen bir kapasite için önerilen yöntem, mevcut TVD yöntemlerinden daha az bozunuma sebep olmaktadır. Önerilen yöntemin kapasite ve bozunum bakımından mevcut yöntemlere göre üstün olduğu bilgisayar benzetimleriyle desteklenmiştir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, HDA ve HDÖ hatalarının genişletilmesine dayalı TVD algoritmaları geliştirilmiştir. Tezin TVD araştırmasına katkıları iki başlık altında toplanabilir: (i) HDA hatasına dayalı TVD, ve (ii) HDÖ hatalarına dayalı uyarlanı TVD algoritmaları ilk kez bu tez kapsamında gerçekleştirilmiştir.

HDA hatasının genişletilmesine dayalı TVD yöntemi Bölüm 3'te tartışılmıştır. Tüm TVD yöntemlerinde, original videoya bir dönüşüm fonksiyonu uygulanarak damga ekleme için bir boşluk oluşturulmaktadır. Boşluğun miktarı damgalama kapasitesini belirlediğinden, dönüşüm fonksiyonu videodaki uzamsal ve zamansal ilintiyi mümkün olduğunca giderecek şekilde tasarlanmalıdır. Önceki TVD araştırmalarında videodaki zamansal ilintiyi gidermek amacıyla sadece bir referans çerçeve kullanılan HDÖ kullanılmıştır. Bölüm 3'deki çalışmada ise, iki referans çerçeve kullanan ve videodaki zamansal ilintinin daha etkin bir şekilde giderilmesini sağlayan HDA kullanılmıştır. Önerilen ve mevcut yöntemlerin performansını belirlemek amacıyla kapasitenin fonksiyonu cinsinden videoda oluşan bozunum (BPP-PSNR değişimi) ve yan bilgi miktarı kullanılmıştır. Çeşitli test videoaları için gerçekleştirilen simülasyonlarda, önerilen yöntemin verilen bir kapasite için diğer yöntemlere göre orijinal videoda daha az bozunum oluşturduğu gözlemlenmiş ve mevcut yöntemlere göre oldukça az miktarda yan bilgiye gereksinim duyduğu tespit edilmiştir.

Bölüm 4'te, HDÖ hatalarının genişletilmesine dayalı uyarlanı bir TVD algoritması geliştirilmiştir. Öngörü hatasından bağımsız olarak tüm blokları aynı şekilde damgalayan mevcut TVD yöntemlerinin aksine önerilen yöntem, düşük ve yüksek öngörü hatasına sahip blokları farklı şekillerde damgalamaktadır. Bu yaklaşıma uyarlanı damgalama denmektedir. Ayrıca, yüksek öngörü hatasına sahip olan pikseller damgalamada kullanılmayarak damgalama sonucu orijinal videoda oluşan bozunum azaltılmıştır. Ancak uyarlanı damgalama yüksek BPP değerlerinde etkili

olduğundan yukarıdaki gözlemler belirli bir kapasitenin üstünde için geçerlidir. Aksi belirtilmediği sürece, tezin geri kalan kısmında Bölüm 3'te geliştirilen yöntem Yöntem 1; Bölüm 4'te geliştirilen yöntem Yöntem 2 olarak adlandırılacaktır. Yöntem 1 düşük damgalama kapasitelerinde yüksek performansa sahiptir. Bölüm 3'teki önerilen damgalama metodunda aradeğerleme yöntemi iki çerçeve kullanılarak aradeğerleme çerçevesi oluşturulmaktadır. Fakat Bölüm 4'te önerilen yöntemde ise öngörü çerçevesi sadece bir çerçeve kullanılarak elde edilmektedir. Ayrıca aradeğerleme metodu ile elde edilen tahmin öngörü metodununkine göre daha iyi olmaktadır. Ancak Bölüm 4'teki yöntem uyarlamalı olsa da uyarlamalı damgalama düşük kapasite değerlerinde etkili değildir. Dolayısıyla düşük kapasite değerlerinde Bölüm 3'teki yöntemin daha iyi sonuç vermesi sürpriz olarak yorumlanmamıştır. Bölüm 4'teki yöntem ise yüksek kapasite değerlerinde hem uyarlamalı damgalama hem de piksel seçme algoritması ile performansı diğer tüm yöntemlerden daha iyi olmaktadır. Yöntem 1'de iki referans çerçeve kullanılarak aradeğerleme çerçevesi oluşturulmaktadır. Buna karşın Yöntem 2'de öngörü çerçevesi sadece bir çerçeve kullanılarak elde edilmektedir. Bu nedenle aradeğerlemeyle oluşturulan çerçeve öngörü ile oluşturulan çerçeveye göre orijinel çerçeveye daha yakın çıkmaktadır. Diğer yandan Yöntem 2'deki uyarlamalı yapı düşük kapasite değerlerinde etkili değildir. Bu açıklamalar ışığında, düşük damgalama kapasite değerlerinde Yöntem 1, yüksek damgalama kapasitelerinde ise Yöntem 2'nin kullanılması tavsiye edilebilir.

TVD henüz oldgunlaşmamış bir araştırma alanı olup yanıtlanması gereken çok sayıda soru içermektedir. Bu tezde yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak ilerki çalışmalarda aşağıdaki alanlarda araştırma yapılabilir.

- Yöntem 1'de hata çerçevesi oluşturmak amacıyla düşük hesap yüküne sahip HDA algoritması kullanılmıştır. Daha kapsamlı HDA algoritmalarının kullanılmasının kapasite etkisi araştırılabilir. Örneğin, iki çerçeve yerine daha fazla çerçeve aradeğerleme metodunda kullanıldığında özellikle açılma kapanmanın mevcut olduğu videolarda aradeğerleme hatalarının küçülmesi ve dolayısıyla kapasitenin artması beklenir.

- Yöntem 1’de sadece zamansal aradeğerleme incelenmişti. Uzamsal ve/veya uzamsal-zamansal aradeğerlemenin kapasite bozunum performansına etkisi araştırılabilir. Benzer gözlem Yöntem 2 için de geçerlidir.
- Yöntem 2’de hata çerçevesi oluşturmak amacıyla düşük hesap yüklü basit bir HDÖ gerçekleştirilmiştir. Daha etkin HDÖ ve karmaşık algoritma yöntemlerinin kapasite bozunum performansına etkisi araştırılabilir. Örneğin, bir referans çerçeve yerine birden fazla referans çerçeve kullanılarak öngörü çerçevesi oluşturulabilir veya blok tabanlı HDÖ yerine çerçeve tabanlı HDÖ yöntemleri kullanılabilir.
- Videoda kapanma ve açılma olaylarının mevcut olduğu çerçevelerde hem aradeğerleme hem de öngörü iyi sonuçlar vermemektedir. Açılma-kapanma bilgisi dikkate alınarak yöntemler uyarlanabilir hale getirilebilir. Ancak açılma-kapanma bilgisinin damga çözücüye yan bilgi olarak ekleneceği ve etkili bir şekilde nasıl iletileceği araştırılabilir.
- Yanıtlanması gereken önemli problemlerden birisi de kapasitenin çerçevelere nasıl dağıtılacağıdır. Yöntem 1 ve Yöntem 2’de optimum olmayan fakat pratikte kullanılacak yöntemler sunulmuştur. Verilen bir kapasite için bozunumlu en küçükleyen analitik çözümler geliştirebilir.
- TVD algoritmalarında damga ekleme aşaması iki adımdan oluşur: Videonun temsilinin değiştirilmesi ve yeni temsilde tersinir damglamanın gerçekleştirilmesi. Mevcut çalışmalarda bu iki adım birbirinden bağımsız ele alınmıştır Diğer bir deyişle bazı yöntemler temsil değiştirme yönteminin en iyilenmesini üzerine yoğunlaşırken bazı yöntemler tersinir damgalamanın en iyilenmesine odaklanmıştır. Ancak iki adımın birlikte nasıl en iyileneceği araştırılabilir.
- Literatürde son zamanlarda etkili ve iyi sonuç veren yöntemler sunulmuştur [31], [36–46]. Bu yöntemler TVD için uyarlanır hale getirilebilir.
-

KAYNAKLAR

- [1] PODILCHUK, CI., DELP, EJ., Digital Watermarking: Algorithms and Applications. July, pp. 33–46, 2001.
- [2] MAES, M., KALKER, T., LINNARTZ, JM., TALSTRA, GJ., DEPOVERE, GF., JAAP, H., Digital Watermarking for DVD Video Copy Protection. Signal Process. Mag. IEEE, September, pp. 47–57, 2000.
- [3] BLOOM, JA., COX, IJ., KALKER, TON., LINNARTZ, JMG., MILLER, ML., TRAW, CBS., Copy Protection for DVD Video. vol. 87, no. 7, pp. 1267–1276, 1999.
- [4] LIN, ET., ESKİCİOĞLU, AM., LAGENDIJK, RL., DELP, EJ., Advances in Digital Video Content Protection. vol. 93, no. 1, pp. 171–183, 2005.
- [5] FURHT, B., MUHAREMAGIC, E., SOCEK, D., Multimedia Encryption and Watermarking. Springer.
- [6] MOULIN, P., KOETTER, R., Data-Hiding Codes. Proc. IEEE, vol. 93, no. 12, pp. 2083–2126, Dec. 2005.
- [7] FENG, J., LIN, I., TSAI, C., CHU, Y., Reversible Watermarking : Current Status and Key Issues. vol. 2, no. 3, pp. 161–170, 2006.
- [8] BARTON, J., Method and Apparatus for Embedding Authentication Information Within Digital Data. 9971997.
- [9] THODI, DM., RODRIGUEZ, JJ., Expansion Embedding Techniques for Reversible Watermarking. vol. 16, no. 3, pp. 721–730, 2007.
- [10] 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.
- [11] FRIDRICH, J., Lossless Data Embedding - New Paradigm. pp. 185–196, 2002.
- [12] XUAN, G., YANG, C., ZHEN, Y., Shi, YQ., Ni, Z., Reversible Data Hiding Based on Wavelet Spread Spectrum. IEEE 6th Work. Multimed. Signal Process., pp. 211–214, 2004.

- [13] FENG, JB., WU, HC., TSAI, CS., CHU, YP., A new multi-secret images sharing scheme using Lagrange's interpolation. *J. Syst. Softw.*, vol. 76, no. 3, pp. 327–339, Jun. 2005.
- [14] CELİK, 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.
- [15] WU, X., Lossless Compression of Continuous-Tone Images via Context Selection, Quantization, and Modeling. *IEEE Trans. image Process.*, vol. 6, no. 5, pp. 656–664, 1997.
- [16] TIAN, J., Reversible data embedding using a difference expansion. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 13, no. 8, pp. 890–896, Aug. 2003.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] LUO, L., CHEN, Z., CHEN, M., ZENG, X., XIONG, Z., Reversible ImageWatermarking Using Interpolation Technique. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 5, no. 1, pp. 187–193, 2010.
- [22] NI, Z., SHI, YQ., ANSARI, N., SU, W., Reversible data hiding. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 354–362, Mar. 2006.
- [23] 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.
- [24] LIN, CC., HSUEH, NL., A lossless data hiding scheme based on three-pixel block differences. *Pattern Recognit.*, vol. 41, no. 4, pp. 1415–1425, Apr. 2008.
- [25] TSAI, P., HU, YC., YEH, HL., Reversible image hiding scheme using predictive coding and histogram shifting. *Signal Processing*, vol. 89, no. 6, pp. 1129–1143, Jun. 2009.

- [26] KIM, KS., LEE, MJ., LEE, HY., LEE, HK., Reversible data hiding exploiting spatial correlation between sub-sampled images. *Pattern Recognit.*, vol. 42, no. 11, pp. 3083–3096, Nov. 2009.
- [27] WU, X., MEMON, N., Context-Based , Adaptive , Lossless Image Coding. *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 4, pp. 437–444, 1997.
- [28] 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.
- [29] TAI, W., YEH, C., CHANG, C., Reversible Data Hiding Based on Histogram Modification. vol. 19, no. 6, pp. 906–910, 2009.
- [30] HONG, W., Adaptive reversible data hiding method based on error energy control and histogram shifting. *Opt. Commun.*, vol. 285, no. 2, pp. 101–108, Jan. 2012.
- [31] LI, X., LI, B., YANG, B., ZENG, T., General framework to histogram-shifting-based reversible data hiding. *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 22, no. 6, pp. 2181–91, Jun. 2013.
- [32] COLTUC, D., Improved Embedding for Prediction Based Reversible Watermarking. *IEEE Trans. Inf. FORENSICS Secur.*, vol. 6, no. 3, pp. 873–882, 2011.
- [33] ZENG, ZX., CHEN, ZY., CHEN, M., Reversible Video Watermarking Using Motion Estimation and Prediction Error Expansion. vol. 27, pp. 465–479, 2011.
- [34] CHUNG, K., YANG, W., CHANG, T., LIAO, HM., Efficient Multilevel Reversible Data Hiding for Video Sequences Using Temporal and Spatial Approach. in *Proceedings of 2009 APSIPA Annual Summit and Conference*, 2009.
- [35] WANG, Y., OSTERMANN, J., ZHANG, Y., *Video Processing and Communications*. Prentice Hall, 2002.
- [36] WANG, N., ZHANG, H., MEN, C., A high capacity reversible data hiding method for 2D vector maps based on virtual coordinates. *Comput. Des.*, vol. 47, pp. 108–117, Feb. 2014.
- [37] CHEN, X., SUN, X., SUN, H., ZHOU, Z., ZHANG, J., Reversible watermarking method based on asymmetric-histogram shifting of prediction errors. *J. Syst. Softw.*, vol. 86, no. 10, pp. 2620–2626, Oct. 2013.
- [38] COATRIEUX, G., CUPPENS-BOULAHIA, N., CUPPENS, F., ROUX, C., *Reversible Watermarking Based on Invariant Image Classification and*

- Dynamic Histogram Shifting. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 8, no. 1, pp. 111–120, Jan. 2013.
- [39] HU, X., ZHANG, W., HU, X., YU, N., ZHAO, X., LI, F., Fast Estimation of Optimal Marked-Signal Distribution for Reversible Data Hiding, *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.* vol. 8, no. 5, pp. 779–788, May 2013.
- [40] LEUNG, HY., CHENG, LM., LIU, F., FU, QK., Adaptive reversible data hiding based on block median preservation and modification of prediction errors. *J. Syst. Softw.*, vol. 86, no. 8, pp. 2204–2219, Aug. 2013.
- [41] LI, X., LI, J., LI, B., YANG, B., High-fidelity reversible data hiding scheme based on pixel-value-ordering and prediction-error expansion. *Signal Processing*, vol. 93, no. 1, pp. 198–205, Jan. 2013.
- [42] LI, X., ZHANG, W., GUI, X., YANG, B., A Novel Reversible Data Hiding Scheme Based on Two-Dimensional Difference-Histogram Modification. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 8, no. 7, pp. 1091–1100, 2013.
- [43] OU, B., LI, X., ZHAO, Y., NI, R., Reversible data hiding based on PDE predictor. *J. Syst. Softw.*, vol. 86, no. 10, pp. 2700–2709, Oct. 2013.
- [44] OU, B., LI, X., ZHAO, Y., NI, R., SHI, YQ., Pairwise prediction-error expansion for efficient reversible data hiding. *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 22, no. 12, pp. 5010–21, Dec. 2013.
- [45] PEI, Q., WANG, X., LI, Y., LI, H., Adaptive reversible watermarking with improved embedding capacity. *J. Syst. Softw.*, vol. 86, no. 11, pp. 2841–2848, Nov. 2013.
- [46] FUJIWARA, S., TAGUCHI, A., Motion-compensated frame rate up-conversion based on block matching algorithm with multi-size blocks. *Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2005. ISPACS 2005. Proceedings of 2005 International Symposium on*, vol., no., pp.353,356, 13-16 Dec. 2005.
- [47] JIANTAO Z., AU, OC., Determining the Capacity Parameters in PEE-Based Reversible Image Watermarking. *Signal Processing Letters, IEEE*, vol.19, no.5, pp.287,290, May 2012

ÖZGEÇMİŞ

Burhan Baraklı, 06.06.1980'de Antalya'da doğdu. İlköğretimi Bolu'da orta ve lise eğitimini Adapazarı'nda tamamladı. 1998 yılında Atatürk Lisesi, Fen Bilimleri bölümünden mezun oldu. 2001 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünü 2005 yılında bitirdi. 2005-2007 yılları arasında Vurkon Vuruşkan Kontrol Ltd.Şti.'nde mühendis olarak çalıştı. Bu süre içerisinde şirketin ürettiği beton üretim tesislerinin kuruluşunda yer aldı. 2007 yılından beri Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.