T.C.

Radyo ve Televizyon Üst Kurulu

SAYISAL TELEVİZYON YAYINCILIĞINDA SIKIŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

ÜST KURUL UZMANLIK TEZİ

Musa AKAR

ANKARA

HAZİRAN / 2017

T.C.

Radyo ve Televizyon Üst Kurulu

SAYISAL TELEVİZYON YAYINCILIĞINDA SIKIŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

ÜST KURUL UZMANLIK TEZİ

Musa AKAR

DANIŞMAN

ÜST KURUL UZMANI Uğur BOĞA

ANKARA

HAZİRAN / 2017

RADYO VE TELEVİZYON ÜST KURULU BAŞKANLIĞINA

Bu çalışma, Tez Değerlendirme Komisyonu tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uzmanlık Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Adı Soyadı	İmza
Başkan	:	
Üye	:	
Üye	:	
Üye	:	
Üye	:	

ONAY
... / ... / 2017

Prof. Dr. İlhan YERLİKAYA
Üst Kurul Başkanı

TEZ TESLİM TUTANAĞI VE DOĞRULUK BEYANI

Radyo ve Televizyon Üst Kurulu Uzman Yardımcılığı Giriş ve Yeterlik Sınavları ile Uzmanlığa Atanma, Yetiştirilme, Görev, Yetki ve Çalışma Usul ve Esasları Hakkında Yönetmeliğin 19 uncu maddesinin 4 üncü fıkrasına istinaden çıkartılan Radyo ve Televizyon Üst Kurulu Tez Hazırlama Yönergesi'ne uygun olarak hazırlamış olduğum uzmanlık tezi ilişikte sunulmuştur.

Bu uzmanlık tezindeki bütün bilgileri akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak toplayıp sunduğumu; ayrıca, bu kural ve ilkelerin gereği olarak, çalışmada bana ait olmayan tüm veri, düşünce ve sonuçları andığımı ve kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

Bilgilerinizi ve gereğini arz ederim.

… / 06 / 2017
Musa AKAR
Üst Kurul Uzman Yardımcısı
Uzmanlık Tezinin Adı: Sayısal Televizyon Yayıncılığında Sıkıştırma Teknolojileri ve Uygulamaları

EK:

1- Tez (2 Adet)
2- CD (1 Adet)

Tezi Teslim Alan
Daire Başkanı

... / 06 / 2017

TEŞEKKÜR

"Sayısal Televizyon Yayıncılığında Sıkıştırma Teknolojileri ve Uygulamaları" isimli bu tezin hazırlanması sürecinde yoğun çalışma temposuna rağmen desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Uğur BOĞA'ya, değerli mesai arkadaşlarıma ve hoşgörüsüyle sürekli yanımda olan sevgili eşim Tuğba AKAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR I

İÇİNDEKİLER II

KISALTMALAR VI

ŞEKİLLER LİSTESİ XIII

TABLOLAR LİSTESİ XVI

GİRİŞ 1

BİRİNCİ BÖLÜM 6

SAYISAL YAYINCILIK KAVRAMI VE STANDARTLARI 6

1.1. ANALOG YAYIN 6

1.2. ANALOG YAYIN STANDARTLARI 8

1.2.1. NTSC (National Television Systems Committee) 9

1.2.2. PAL (Phase Alternation Line) 10

1.2.3. SECAM (Séquentiel Couleur Àvec Mémoire) 11

1.3. SAYISAL YAYIN 12

1.4. SAYISAL YAYIN STANDARTLARI 15

1.5. SAYISAL YAYINCILIKTA KULLANILAN İLETİM ORTAMLARI 16

1.5.1. Sayısal Karasal Yayıncılık 16

1.5.2. Sayısal Kablo Yayıncılığı 17

1.5.3. Sayısal Uydu Yayıncılığı 18

1.5.4. Mobil Cihazlarda Sayısal Televizyon Yayıncılığı 20

1.5.5. IPTV Yayıncılığı 22

1.5.6. Web TV Yayıncılığı 23

İKİNCİ BÖLÜM 24

VERİ SIKIŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ 24

2.1. TEMEL KAVRAM VE TEKNİKLER 26

2.1.1. Sıkıştırma Oranı 26

2.1.2. Sıkıştırma Kazancı 27

2.1.3. Entropi Kavramı 27
2.1.4. Huffman Kodlama 29
2.1.5. LZW (Lempel – Ziv – Welch) Tekniği 34
2.1.6. MSE (Mean Squared Error) 37
2.1.7. PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) 37

2.2. GÖRÜNTÜ SIKIŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ 38
2.2.1. Kayıpsız Görüntü Sıkıştırma Teknolojileri 38
2.2.1.1. Bitmap 39
2.2.1.2. GIF (Graphics Interchange Format) 39
2.2.1.3. PNG (Portable Network Graphics) 39
2.2.2. Kayıplı Görüntü Sıkıştırma Teknolojileri 40
2.2.2.1. JPEG (Joint Photographic Experts Group) 40
2.2.2.2. JPEG2000 (Joint Photographic Experts Group - 2000) 46
2.2.2.3. JPEGXR (Joint Photographic Experts Group – Extended Range) 50
2.2.2.4. JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR Teknolojilerinin Karşılaştırılması 56

2.3. SES SIKIŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ 60
2.3.1. Temel Kavram ve Teknikler 60
2.3.1.1. Kanal Sayısı 61
2.3.1.2. Örnekleme Frekansı 62
2.3.1.3. Bit Derinliği 62
2.3.1.4. Kbit/s Kavramı 63
2.3.1.5. PCM(Pulse Code Modulation) 63
2.3.2. Kayıpsız Ses Sıkıştırma Teknolojileri 66
2.3.2.1. WAV (Waveform Audio File Format) 66
2.3.2.2. AIFF (Audio Interchange File Format) 67
2.3.2.3. FLAC (Free Lossless Audio Codec) 67
2.3.2.4. ALAC (Apple Lossless Audio Codec) 67
2.3.3. Kayıplı Ses Sıkıştırma Teknolojileri 68
2.3.3.1. MP3 (Moving Picture Expert Group – Audio Layer 3) 68
2.3.3.2. AAC (Advanced Audio Coding) 69
2.3.3.3. HE-AAC (High Efficiency Advanced Audio Coding) 70
2.3.3.4. Kayıplı Ses Sıkıştırma Teknolojilerinin Karşılaştırılması 71
2.3.4. Kayıplı ve Kayıpsız Ses Sıkıştırma Teknolojilerinin Veri Boyutu Açısından Karşılaştırılması 72

2.4. VİDEO SIKIŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ 74
2.4.1. Video Sıkıştırma Teknolojilerinin Genel Yapısı 76
2.4.2. H.264/AVC (Advanced Video Coding) 79
2.4.2.1. Genel Kodlama ve Kod Çözme Yapısı 80
2.4.2.2. Çerçeve, Dilim, Makro Blok ve Alt Makro Blok Yapısı 82
2.4.2.3. Çerçeve İçi Tahmin Yöntemi 83
2.4.2.3.1. Intra 4×4 Kodlama (Parlaklık Bileşeni) 84
2.4.2.3.2. Intra 8×8 Kodlama (Parlaklık Bileşeni) 85
2.4.2.3.3. Intra 16×16 Kodlama (Parlaklık Bileşeni) 86
2.4.2.3.4. Intra 8×8 Kodlama (Renklilik Bileşeni) 87
2.4.2.4. Çerçeveler Arası Tahmin Yöntemi 87
2.4.2.4.1. P Dilim Yöntemi 88
2.4.2.4.2. B Dilim Yöntemi 89
2.4.2.5. Dönüşüm, Niceleme ve Entropi Kodlama İşlemleri 89
2.4.2.6. Profil ve Seviyeler 91
2.4.3. H.265/HEVC (High Efficiency Video Coding) 93
2.4.3.1. Genel Kodlama ve Kod Çözme Yapısı 94
2.4.3.2. CTU, CU, PU, TU Birimlerinin Yapısı 94
2.4.3.2.1. CTU ve CTB Birimleri 95
2.4.3.2.2. CU ve CB Birimleri 95
2.4.3.2.3. PU ve PB Birimleri 98
2.4.3.2.4. TU ve TB Birimleri 100
2.4.3.3. Çerçeve İçi Tahmin Yöntemi 102
2.4.3.4. Çerçeveler Arası Tahmin Yöntemi 105
2.4.3.5. Dönüşüm, Niceleme ve Entropi Kodlama İşlemleri 106
2.4.3.6. Profil, Katman ve Seviyeler 108
2.4.3.6.1. Profiller 108
2.4.3.6.2. Katmanlar 110
2.4.3.6.3. Seviyeler 110
2.4.4. H.264/AVC ve H.265/HEVC Teknolojilerinin Karşılaştırılması 111

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM 121
H.265/HEVC TEKNOLOJİSİNİN SAYISAL YAYINCILIĞA ETKİSİ 121

3.1. SAYISAL TELEVİZYON YAYINCILIĞINDA KULLANILAN GÖRÜNTÜ TEKNOLOJİLERİ 121
3.1.1. SD (Standard Definition) Görüntü Teknolojisi 122
3.1.2. HD (High Definition) Görüntü Teknolojisi 123
3.1.3. UHD/4K (Ultra High Definition/4K) Görüntü Teknolojisi 124
3.1.3.1. UHD/4K İçerikler 126
3.1.3.2. HDR (High Dynamic Range) 127
3.1.3.3. Geniş Renk Dizisi 127
3.1.3.4. Kare Sayısı 128
3.1.4. 8K Görüntü Teknolojisi 129
3.1.5. SD, HD, UHD/4K ve 8K Görüntü Teknolojilerinin Karşılaştırılması 130

3.2. H.265/HEVC TEKNOLOJİSİNİN KARASAL VE UYDU ORTAMINDA KULLANILMASI 132
3.2.1. H.265/HEVC ve DVB-T2 Teknolojilerinin Birlikte Kullanımı 132
3.2.2. H.265/HEVC ve DVB-S2 Teknolojilerinin Birlikte Kullanımı 140

3.3. DÜNYA GENELİNDE GERÇEKLEŞTİRİLEN UYGULAMALAR 146
3.3.1. Güney Kore 150
3.3.2. Fransa 154
3.3.3. İspanya 156
3.3.4. Japonya 158
3.3.5. Türkiye 160

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 162

KAYNAKÇA 170

EKLER 181

ÖZET 186

ABSTRACT 188

ÖZGEÇMİŞ 190

KISALTMALAR

4K	4K Çözünürlük (3840×2160)
8K	8K Çözünürlük (7680×4320)
a.g.e	Adı Geçen Eser
a.g.k	Adı Geçen Kaynak
a.g.m	Adı Geçen Makale
a.g.t	Adı Geçen Tez
AAC	Gelişmiş Ses Kodlama (Advanced Audio Coding)
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ABU	Asya - Pasifik Yayın Birliği (Asia - Pacific Broadcasting Union)
AIFF	Ses Değişim Dosyası Biçimi (Audio Interchange File Format)
ALAC	Apple Kayıpsız Ses Kodeği (Apple Lossless Audio Codec)
ALF	Adaptif Döngü Filtresi (Adaptive Loop Filter)
AMVP	Gelişmiş Hareket Vektörü Tahmini (Advanced Motion Vector Prediction)
APSK	Genlik ve Faz - Kaydırmalı Anahtarlama (Amplitude and Phase - Shift Keying)
ASCII	Bilgi Değişimi İçin Amerikan Kodlama Sistemi (American Standard Code For Information Interchange)
ASI	Asenkron Seri Arayüz (Asynchronous Serial Interface)
AsiaSAT	Asya Uydu Telekomünikasyon Limited Şirketi
ATSC	Amerika Sayısal Televizyon Standardı (Advanced Television System Committee)
AVC	Gelişmiş Video Kodlama (Advanced Video Coding)
BBC	Britanya Yayın Şirketi (British Broadcasting Corporation)
Bkz.	Bakınız
BTK	Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu
C/N	Taşıyıcı Gürültü Oranı (Carrier to Noise Ratio)
CABAC	İçerik Uyumlu İkili Aritmetik Kodlama (Context Adaptive Binary Arithmetic Coding)

CAVLC	İçerik Uyumlu Değişken Uzunluk Kodlaması (Context Adaptive Variable Length Coding)
CB	Kodlama Bloğu (Coding Block)
Cb	Mavi Renklilik Bileşeni (Chrominance Blue)
CBR	Sabit Bit Hızı (Constant Bit Rate)
CD	Kompakt Disk (Compact Disc)
CMOS	Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
Cr	Kırmızı Renklilik Bileşeni (Chrominance Red)
CTB	Kodlama Ağacı Bloğu (Coding Tree Block)
CTU	Kodlama Ağacı Birimi (Coding Tree Unit)
CU	Kodlama Birimi (Coding Unit)
DAB	Sayısal Radyo Yayıncılığı (Digital Audio Broadcasting)
dB	Desibel
DCT	Ayrık Kosinüs Dönüşümü (Discrete Cosine Transform)
DRM	Sayısal Radyo Yayıncılığı - Mondiale (Digital Radio Mondiale)
DST	Ayrık Sinüs Dönüşümü (Discrete Sine Transform)
DVB - C	Kablo Ortamından Sayısal Video Yayıncılığı (Digital Video Broadcasting - Cable) - Avrupa
DVB - C2	İkinci Nesil Kablo Ortamından Sayısal Video Yayıncılığı (Digital Video Broadcasting - Second Generation Cable) - Avrupa
DVB - H	Sayısal Mobil Video Yayıncılığı (Digital Video Broadcasting - Handheld) - Avrupa
DVB - S	Uydu Ortamından Sayısal Video Yayıncılığı (Digital Video Broadcasting - Satellite) - Avrupa
DVB - S2	İkinci Nesil Uydu Ortamından Sayısal Video Yayıncılığı (Digital Video Broadcasting - Second Generation Satellite) - Avrupa
DVB - S2x	İkinci Nesil Uydu Ortamından Sayısal Video Yayıncılığı - Genişletilmiş (Digital Video Broadcasting - Second Generation Satellite/Extension) - Avrupa
DVB - T	Sayısal Karasal Video Yayıncılığı (Digital Video Broadcasting - Terrestrial) - Avrupa

DVB - T2	İkinci Nesil Sayısal Karasal Video Yayıncılığı (Digital Video Broadcasting - Second Generation Terrestrial) - Avrupa
DVB	Sayısal Video Yayıncılığı (Digital Video Broadcasting) - Avrupa
DVD	Çok Amaçlı Sayısal Disk (Digital Versatile Disc)
DWT	Ayrık Dalgacık Dönüşümü (Discrete Wavelet Transform)
E	Eşitlik
EBU	Avrupa Yayın Birliği (European Broadcasting Union)
EPG	Elektronik Program Rehberi (Electronic Program Guide)
ESPN	Eğlence ve Spor Programlama Ağı (Entertainment and Sports Programming Network)
ETSI	Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (European Telecommunications Standard Institute)
EutelSAT	Avrupa Telekomünikasyon ve Uydu Örgütü (European Telecommunications Satellite Organization)
FCT	İleri Çekirdek Dönüşümü (Forward Core Transform)
FEC	İleri Hata Düzeltme (Forward Error Correction)
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FLAC	Ücretsiz - Kayıpsız Ses Kodeği (Free Lossless Audio Codec)
Fps	Saniyedeki Görüntülenecek Kare Sayısı (Frame per Second)
GIF	Grafik Değiştirme Biçimi (Graphics Interchange Format)
HD	Yüksek Tanımlamalı / Çözünürlüklü (High Definition)
HDMI	Yüksek Tanımlamalı Çoklu Ortam Arayüzü (High Definition Multimedia Interface)
HDR	Yüksek Dinamik Aralık (High Dynamic Range)
HDTV	Yüksek Tanımlamalı / Çözünürlüklü Televizyon (High Definition Television)
HE - AAC	Yüksek Verimli Gelişmiş Ses Kodlama (High Efficiency Advanced Audio Coding)
HEVC	Yüksek Verimli Video Kodlama (High Efficiency Video Coding)
HispaSAT	İspanyol Uydu Haberleşme Operatörü
HPF	Yüksek Geçirgen Filtre (High Pass Filter)

IBC	Uluslararası Yayın Konferansı (International Broadcasting Conference)
ICT	Ters Çevrilemez Bileşen Dönüşümü (Irreversible Component Transform)
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IMT	International Mobile Telecommunications
IntelSAT	Uluslararası Telekomünikasyon ve Uydu Örgütü (International Telecommunications Satellite Organization)
IP	İnternet Protokolü (Internet Protocol)
IPTV	İnternet Protokolü Temelli Televizyon (Internet Protocol Television)
ISDB	Sayısal Video Yayıncılığı Standardı (Integrated Services Digital Broadcasting) - Japonya
ISDN	Tümleşik Sayısal Ağ Hizmetleri (Integrated Services Digital Network)
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization)
ITU - R	ITU - Radyokomünikasyon Sektörü (ITU Radiocommunications Sector)
ITU - T	ITU - Telekomünikasyon Sektörü (ITU Telecommunications Sector)
ITU	Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union)
i	Geçmeli (Interlaced)
JPEG	Birleşik Fotoğraf Uzmanlar Grubu (Joint Photographic Experts Group)
JPEG2000	Birleşik Fotoğraf Uzmanlar Grubu - 2000 (Joint Photographic Experts Group - 2000)
JPEGXR	Birleşik Fotoğraf Uzmanlar Grubu - Genişletilmiş (Joint Photographic Experts Group - Extended Range)
JVT	Ortak Video Ekibi (The Joint Video Team)
kbit/s	kilobit / saniye (kilobit / second)

KBS	Kore Yayın Şirketi (Korean Broadcasting System)
KCC	Kore İletişim Komisyonu (Korea Communications Commission)
kHz	Kilohertz
LPF	Alçak Geçirgen Filtre (Low Pass Filter)
LZW	Lempel - Ziv - Welch
MB	Megabayt (Megabyte)
MBC	Munhwa Yayın Şirketi (Munhwa Broadcasting Corporation)
Mbit/s	Megabit/saniye (Megabit/second)
MFN	Çoklu Frekans Ağı (Multi Frequency Network)
MHz	Megahertz
MIMO	Çok Girişli Çok Çıkışlı (Multiple Input Multiple Output)
MOS	Ortalama Görüş Puanı (Mean Opinion Score)
MP3	Hareketli Görüntü Uzmanlar Grubu - Ses Katmanı 3 (Moving Picture Expert Group - Audio Layer 3)
MPEG	Hareketli Resimler Uzmanlar Grubu (Moving Pictures Experts Group)
MPM	En Olası Mod (Most Probable Mode)
MSE	Hataların Kare Ortalaması (Mean Squared Error)
MSIP	Ministry of Science, ICT and Future Planning (Bilim, Bilgi ve İletişim Teknolojileri ve Geleceği Planlama Bakanlığı) - Güney Kore
MSS	Mobil Uydu Hizmetleri (Mobile Satellite Services)
NAB	Ulusal Yayıncılar Birliği (National Association of Broadcasters) - Amerika
NHK	Ulusal Kamu Yayın Kuruluşu (Nippon Hōsō Kyōkai) - Japonya
NTSC	Ulusal Televizyon Sistemleri Komitesi (National Television Systems Committee)
OT	Örtüşme Dönüşümü (Overlap Transform)
Ör.	Örneğin
p	Taramalı (Progressive)
PAL	Satır Atlamalı Faz (Phase Alternation Line)
PB	Tahmin Bloğu (Prediction Block)
PCM	Darbe Kod Modülasyonu (Pulse Code Modulation)
PI	Taşınabilir Bina İçi (Portable Indoor)

PNG	Taşınabilir Ağ Grafiği (Portable Network Graphics)
PO	Taşınabilir Bina Dışı (Portable Outdoor)
Pr.	Program
PSNR	Maksimum Sinyal Değerinin Gürültüye Oranı (Peak Signal to Noise Ratio)
PSTN	Genel Anahtarlamalı Telefon Şebekesi (Public Switched Telephone Network)
PU	Tahmin Birimi (Prediction Unit)
QAM	Dörtlü Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation)
QP	Niceleme Parametresi (Quantization Parameter)
QPSK	Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying)
RCT	Ters Çevrilebilir Bileşen Dönüşümü (Reversible Component Transform)
Rec	Tavsiye Doküman (Recommendation)
RGB	Kırmızı Yeşil Mavi (Red Green Blue)
RLE	Uzunluk Kodlama (Run Length Encoding)
ROI	İlgi Bölgesi (Region of Interest)
RQT	Dörtlü Artık Ağaç Yapısı (Residual Quad-Tree Structure)
RRC	Bölgesel Radyokomünikasyon Konferansı (Regional Radiocommunication Conference)
RTÜK	Radyo ve Televizyon Üst Kurulu
RTVE	İspanya Radyo ve Televizyon Kurumu (Corporación de y Radyo Televizyon Española)
s.	Sayfa
SAO	Örnek Dengeli Ayarlama (Sample Adaptive Offset)
SBR	Spektral Bant Çoğaltma (Spectral Band Replication)
SBS	Kore Ulusal Televizyon Kanalı (Seoul Broadcasting System)
SD	Standart Tanımlamalı / Çözünürlüklü (Standart Definition)
SDTV	Standart Tanımlamalı / Çözünürlüklü Televizyon (Standard Definition Television)
SECAM	Bellekli Elektronik Renk Sistemi (Séquentiel Couleur Àvec Mémoire)
SFN	Tek Frekans Ağı (Single Frequency Network)

SI	I Dilimi Anahtarlama (Switching I)
SMUX	İstatistiksel Çoğullama (Statistical Multiplexing)
SP	P Dilimi Anahtarlama (Switching P)
TB	Dönüşüm Bloğu (Transform Block)
TRT	Türkiye Radyo ve Televizyon Kurumu
TU	Dönüşüm Birimi (Transform Unit)
TÜRKSAT	TÜRKSAT Uydu Haberleşme ve Kablo TV ve İşletme A.Ş.
TV	Televizyon
UHD	Ultra Yüksek Tanımlamalı / Çözünürlüklü (Ultra High Definition)
UHD TV	Ultra Yüksek Tanımlamalı / Çözünürlüklü Televizyon (Ultra High Definition Television)
UHF	Ultra Yüksek Frekans (Ultra High Frequency)
UPM	Madrid Politeknik Üniversitesi (Universidad Politécnica de Madrid)
UK	Birleşik Krallık (United Kingdom)
VBR	Değişken Bit Hızı (Variable Bit Rate)
VCEG	Video Kodlama Uzmanları Grubu (Video Coding Experts Group)
VHF	Çok Yüksek Frekans (Very High Frequency)
WAV	Dalga Biçimi Ses Dosyası (Waveform Audio File Format)
WMA	Windows Media Audio
WRC	Dünya Radyokomünikasyon Konferansı (World Radiocommunication Conference)
Y	Parlaklık Bileşeni (Luminance)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Dünya ülkelerinde NTSC, PAL ve SECAM standartlarının kullanımı 12
Şekil 1.2 Analog ve sayısal sinyal 13
Şekil 1.3 Dünya genelinde DVB, ATSC ve ISDB standartlarının kullanımı 15
Şekil 2.1 JPEG teknolojisi sıkıştırma adımları 41
Şekil 2.2 YCbCr uzayı örnekleme formatları 43
Şekil 2.3 DCT dönüşümü 44
Şekil 2.4 JPEG teknolojisi niceleme işlemi 45
Şekil 2.5 JPEG teknolojisi köşegen tarama işlemi 46
Şekil 2.6 JPEG bloklama etkisi 47
Şekil 2.7 DWT dönüşümünde veriyi alt bantlara ayırma işlemi 49
Şekil 2.8 DWT dönüşümünde görüntüyü alt bantlara ayırma işlemi 49
Şekil 2.9 Farklı odak değerlerinde çekilen fotoğraflar 51
Şekil 2.10 HDR görüntü teknolojisi 51
Şekil 2.11 FCT tekniği ve DC, HP, LP katsayıların dağılımı 53
Şekil 2.12 JPEGXR teknolojisi niceleme işlemi 54
Şekil 2.13 LP tahmin yöntemi 55
Şekil 2.14 HP tahmin yöntemi 56
Şekil 2.15 JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR ile sıkıştırılmış görüntüler 57
Şekil 2.16 JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR PSNR değerleri 58
Şekil 2.17 JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR bloklama etkisi 59
Şekil 2.18 JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR bulanıklaşma etkisi 59
Şekil 2.19 Mono ve stereo ses 61
Şekil 2.20 PCM tekniği adımları 63
Şekil 2.21 PCM tekniği niceleme işlemi 64
Şekil 2.22 PCM tekniği kodlama işlemi 65
Şekil 2.23 HE-AAC (aacPLUS v.1 ve v.2) mimarisi 70
Şekil 2.24 AAC, aacPlus v.1 ve aacPlus v.2 teknolojilerinin karşılaştırılması 71
Şekil 2.25 Kayıplı ses sıkıştırma teknolojilerinin karşılaştırılması 72
Şekil 2.26 Video sıkıştırma teknolojilerinin tarihsel gelişimi 76
Şekil 2.27 Uzamsal ve zamansal örnekleme 77
Şekil 2.28 Video sıkıştırma teknolojilerinde kullanılan çerçeve türleri 78
Şekil 2.29 H.264/AVC teknolojisinin kodlama aşamaları 80
Şekil 2.30 H.264/AVC teknolojisinin kod çözme aşamaları 81

Şekil 2.31 Intra 4×4 kodlama tahmin yönleri 84
Şekil 2.32 Intra 4×4 kodlama tahmin modları 85
Şekil 2.33 Intra 8×8 kodlama (Parlaklık bileşeni) 86
Şekil 2.34 Intra 16×16 kodlama (Parlaklık bileşeni) 87
Şekil 2.35 H.264/AVC'nin çerçeveler arası tahminde kullandığı makro bloklar 88
Şekil 2.36 Tam sayı dönüşümde kullanılan hadamard matrisleri 90
Şekil 2.37 H.264/AVC teknolojisi niceleme işlemi 90
Şekil 2.38 H.264/AVC teknolojisi profilleri 92
Şekil 2.39 H.265/HEVC teknolojisinin video sıkıştırma adımları 94
Şekil 2.40 CTU bölümlendirmesi ve kodlama ağacı yapısı 96
Şekil 2.41 Farklı derinlik değerleri için CU bölümlendirmesi 97
Şekil 2.42 H.265/HEVC teknolojisi dilim ve CTU yapısı 98
Şekil 2.43 H.265/HEVC teknolojisi CU yapısı 98
Şekil 2.44 Kare, dikdörtgen ve asimetrik PU boyutları 99
Şekil 2.45 H.265/HEVC teknolojisi PU yapısı 100
Şekil 2.46 H.265/HEVC teknolojisi TU yapısı 101
Şekil 2.47 H.265/HEVC'nin çerçeve içi tahminde kullanmış olduğu modlar 102
Şekil 2.48 H.265/HEVC teknolojisi filtreleme işlemi (SAO ve Bloklama Azaltıcı) 107
Şekil 2.49 H.264/AVC ve H.265/HEVC bölümlendirme işlemi 113
Şekil 2.50 H.264/AVC ve H.265/HEVC'nin uygulandığı video formatları 114
Şekil 2.51 H.264/AVC ile sıkıştırılan Coastguard, Foreman, Mobile ve News video formatlarının PSNR değerleri 115
Şekil 2.52 H.265/HEVC ile sıkıştırılan Coastguard, Foreman, Mobile ve News video formatlarının PSNR değerleri 115
Şekil 2.53 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan Coastguard video formatına ilişkin PSNR değeri ve sıkıştırma süreleri 116
Şekil 2.54 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan Foreman video formatına ilişkin PSNR değeri ve sıkıştırma süreleri 116
Şekil 2.55 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan Mobile video formatına ilişkin PSNR değeri ve sıkıştırma süreleri 117
Şekil 2.56 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan News video formatına ilişkin PSNR değeri ve sıkıştırma süreleri 117
Şekil 2.57 Aynı PSNR değerinde (kalitede) sıkıştırılan H.264/AVC ve H.265/HEVC video kareleri 118
Şekil 2.58 Farklı video sıkıştırma teknolojilerinin PSNR değerleri 120

Şekil 3.1 Geçmeli ve ilerlemeli tarama _____ 122
Şekil 3.2 Gelecek yıllarda dünya genelinde UHD televizyonlar için
tahmin edilen satış oranları _____ 125
Şekil 3.3 BT.709 ve BT.2020 renk standartları _____ 128
Şekil 3.4 30 fps ve 60 fps görüntüler arasındaki fark _____ 129
Şekil 3.5 Farklı görüntü teknolojilerine ait piksel değerleri _____ 130
Şekil 3.6 Televizyonu izleme mesafesi ve televizyon büyüklüğünün
720p, 1080p ve 4K yayınların verimliliğine etkisi _____ 131
Şekil 3.7 İstatistiksel multiplexing'de iletilen kanal sayısına göre elde edilen kazanç ___ 133
Şekil 3.8 27 Mbit/s iletim kapasitesi aracılığıyla iletilebilecek SD ve HD yayın sayıları _ 138
Şekil 3.9 27 Mbit/s iletim kapasitesi aracılığıyla iletilebilecek HD ve Full HD
yayın sayıları _____ 139
Şekil 3.10 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan HD ve 4K yayınların
DVB-S2 ve DVB-S2x teknolojileri aracılığıyla iletilmesi_____ 141
Şekil 3.11 H.264/AVC veya H.265/HEVC ile sıkıştırılan 4K yayınların
DVB-S2 ve DVB-S2x teknolojileri aracılığıyla iletilmesi_____ 142
Şekil 3.12 Görüntü, sıkıştırma ve yayıncılık teknolojilerinin birlikte kullanımı_____ 144
Şekil 3.13 İlk 4K test yayını (Güney Kore)_____ 150
Şekil 3.14 22.2 kanallı surround ses sistemi _____ 159

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1 NTSC standardının genel özellikleri 9
Tablo 1.2 PAL standardı sürümlerinin genel özellikleri 10
Tablo 1.3 SECAM standardı sürümlerinin genel özellikleri 11

Tablo 2.1 Huffman kodlama örneğine ait sembol frekansları 30
Tablo 2.2 Huffman kodlama örneğine ilişkin sonuçlar 33
Tablo 2.3 LZW tekniği örneğine ait başlangıç sözlüğü 35
Tablo 2.4 LZW tekniği örneğine ilişkin sonuç sözlüğü 36
Tablo 2.5 Çeşitli uygulamalar için kullanılan örnekleme frekansları 62
Tablo 2.6 Niceleme seviyeleri 65
Tablo 2.7 Kod değerleri 66
Tablo 2.8 FLAC, MP3, AAC ve HE-AAC teknolojilerinin karşılaştırılması 73
Tablo 2.9 H.264/AVC teknolojisi dilim tipleri 83
Tablo 2.10 Tahmin yönü ve modu arasındaki ilişki (Renklilik bileşeni) 104
Tablo 2.11 H.265/HEVC teknolojisi seviyeleri 110
Tablo 2.12 H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojilerinin temel farklılıkları 112
Tablo 2.13 Durağan videolar için sıkıştırma kazançları 119
Tablo 2.14 Hareketli videolar için sıkıştırma kazançları 119

Tablo 3.1 SD yayınlara ilişkin geçmeli tarama yöntem ve özellikleri 123
Tablo 3.2 HD yayınlara ilişkin geçmeli/ilerlemeli tarama yöntem ve özellikleri 124
Tablo 3.3 UHD formatlarına ilişkin teknik özellikler 126
Tablo 3.4 Farklı görüntü formatlarının iletimi için gerekli bit oranları 133
Tablo 3.5 Sabit yayın alış tipinin kullanılması durumunda iletilebilecek HD, UHD-1 Phase-1 ve UHD-1 Phase-2 yayın sayısı 134
Tablo 3.6 Taşınabilir ve mobil yayın alış tiplerinin kullanılması durumunda iletilebilecek HD, UHD-1 Phase-1 ve UHD-1 Phase-2 yayın sayısı 135
Tablo 3.7 1080/25i, 1080/50p, 2160/25p ve 2160/50p yayınların sayısal uydu yayıncılığı üzerinden iletimi için gerekli olan bit oranları 143
Tablo 3.8 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan SD, HD ve 4K yayınların DVB-S, DVB-S2 ve DVB-S2x teknolojileri aracılığıyla iletilmesi 143
Tablo 3.9 Fransa'da gerçekleştirilen 4K test yayınına ilişkin parametreler 155
Tablo 3.10 İspanya'da gerçekleştirilen 4K test yayınına ilişkin parametreler 157

GİRİŞ

Televizyon yayıncılığı, geçmişten günümüze sürekli bir değişim ve gelişim içerisinde olmuştur. Teknolojik gelişmeler, televizyon yayıncılığına çok hızlı bir şekilde etki etmiş ve yayınların ana kaynağını oluşturan video karelerin üretilmesi, iletilmesi ve alınması gibi süreçler önemli değişimler göstermiştir.

Televizyon yayıncılığı, 1950'li yılların başına kadar siyah beyaz olarak sürdürülmüştür. 1951 yılında ABD'de geliştirilen NTSC standardı ile ilk kez renkli televizyon yayıncılığı başlamıştır. ABD'nin ardından Fransa, SECAM; Almanya ise PAL standartlarını geliştirmiştir. Ülkemizde de televizyon yayıncılığına geçiş aşamasında Almanya'dan alınan teknik destek nedeniyle PAL standardı kullanılmaktadır. İlgili standartlar, analog televizyon yayıncılığı standartları olarak da adlandırılmaktadır.

1990'lı yıllara kadar yoğun olarak kullanılan analog televizyon yayıncılığı, izleyicilerin yüksek kalitede görüntü talepleri ve artan TV yayınlarının frekans spektrumu üzerinden iletimi noktasında yetersiz kalmıştır. Bu olumsuzlukların giderilmesi amacıyla DVB, ATSC ve ISDB olmak üzere 3 farklı sayısal televizyon yayıncılığı standardı geliştirilmiştir. Ülkemizde, Avrupa'da geliştirilen DVB standardı kullanılmaktadır.

Sayısal televizyon yayıncılığı, frekans spektrumunun verimli kullanımı noktasında önemli bir çözüm olmuş ancak sayısal tekniklerin içerik üretiminde de kullanılması veri boyutlarının artmasına neden olmuştur. Artan veri boyutu, yayınların iletilmesi ve arşivlenmesini zorlaştırmıştır. Bu sorunun çözümü için 1990'lı yıllara kadar kullanılan kayıpsız sıkıştırma teknolojileri yetersiz kalmış ve kayıplı sıkıştırma teknolojileri geliştirilmiştir. Kayıplı sıkıştırma teknolojileri

özellikle görüntü, ses ve video verilerinin sıkıştırılmasında yoğun olarak kullanılmaktadır.

1990 yılından itibaren ITU ve ISO/IEC kuruluşları tarafından sırasıyla ITU-T H.261, ISO/IEC MPEG-1, ISO/IEC MPEG-2, ITU-T H.263 ve ISO/IEC MPEG-4 video sıkıştırma teknolojileri geliştirilmiştir. ITU ve ISO/IEC organizasyonlarının yapmış olduğu çalışmalar, 2001 yılına kadar birbirlerinden bağımsız olarak devam etmiştir. 2001 yılında ITU-T'ye bağlı VCEG (Video Coding Experts Group) ve ISO/IEC'e bağlı MPEG (Moving Picture Experts Group) grupları bir araya gelerek JVT (The Joint Video Team) grubunu oluşturmuştur. JVT grubu, günümüzde hala sayısal yayıncılıkta önemini koruyan H.264/AVC ve 2013 yılında standart haline gelen H.265/HEVC video sıkıştırma teknolojilerini geliştirmiştir.

H.264/AVC'nin geliştirilmesindeki temel amaç, kendisinden önce geliştirilen teknolojilere göre daha düşük bit oranlarında sıkıştırma yapabilmek ve bu işlemi, karmaşık tasarımlar kullanmadan gerçekleştirebilmektir. H.264/AVC, sayısal televizyon yayıncılığı başta olmak üzere DVD depolama, RTP/IP paket ağları, düşük veya yüksek çözünürlük içeren geniş ağlar ve sistemler yelpazesinde çalışabilmektedir. H.264/AVC, sayısal televizyon yayıncılığında HD görüntü teknolojisinin kullanılmasını sağlamıştır.

H.265/HEVC, JVT grubu tarafından 2010 yılında taslak metni oluşturulan ve 2013 yılında son şeklini alarak standart hale getirilmiş en güncel ve gelişmiş video sıkıştırma teknolojisidir. H.265/HEVC, H.264/AVC teknolojisine göre aynı bit oranlı sıkıştırmada daha yüksek görüntü kalitesi; aynı görüntü kalitesinde daha düşük bit oranlı sıkıştırma yapabilmektedir. H.265/HEVC, mevcut durumda H.264/AVC ile iletilen SD ve HD yayın sayısını yaklaşık olarak iki katına çıkarmaktadır.

Son yıllarda, izleyicilerin büyük ekran ve yüksek çözünürlük beklentileri doğrultusunda geliştirilen 4K ve 8K görüntü teknolojileri nedeniyle frekans

spektrumunda yoğunluğun ilerleyen yıllarda artması beklenmektedir. İlgili yayınlar ancak H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda verimli olarak iletilebilecektir.

Bu kapsamda, dört bölümden oluşan "Sayısal Televizyon Yayıncılığında Sıkıştırma Teknolojileri ve Uygulamaları" isimli tezin birinci bölümünde geçmişte yoğun olarak kullanılan analog yayıncılık standartları ve günümüzde yoğun olarak kullanılan sayısal yayıncılık standartları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Ayrıca, sayısal yayıncılığın farklı iletim ortamları için sunmuş olduğu avantajlar hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Tezin ana gövdesini oluşturan ikinci bölümde veri sıkıştırma teknolojilerini kapsamlı olarak ele alabilmek için konuya ilişkin temel kavram ve teknikler belirtilmiştir. Görüntü, ses ve video verilerinin sıkıştırılması için kullanılan kayıpsız ve kayıplı teknolojiler aktarılmıştır. Görüntü sıkıştırma alanında kullanılan JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR; ses sıkıştırma alanında kullanılan MP3, AAC ve HE-AAC teknolojileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, HD yayıncılığa geçişi sağlayan H.264/AVC ve 4K - 8K yayıncılığa geçişi sağlayacak H.265/HEVC teknolojileri tüm sıkıştırma adımları ile detaylı olarak ele alınmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde yayıncılıkta kullanılan SD, HD, 4K ve 8K görüntü teknolojileri arasındaki farklılıklar ve H.265/HEVC'nin sahip olduğu sıkıştırma verimliliğinin sayısal televizyon yayıncılığa etkisinin ne ölçüde olacağı incelenmiştir. Ayrıca, H.265/HEVC ile DVB-T2 ve DVB-S2 sayısal yayıncılık teknolojilerinin birlikte kullanımına ilişkin dünya genelinde gerçekleştirilen çalışmalar aktarılmıştır.

Sonuç ve değerlendirme bölümünde ise görüntü, ses ve video sıkıştırma teknolojilerinin verimliliklerinin yanı sıra H.265/HEVC teknolojisinin milli bir servet niteliğindeki frekans spektrumuna etkisi ele alınmıştır. Ayrıca, sayısal televizyon yayıncılığının geleceği üzerinde bazı çıkarımlarda bulunulmuş ve yayıncılık sektöründeki aktörlerin rolü değerlendirilmiştir.

Bu tezin genel amacı, sayısal televizyon yayıncılığında geçmişten günümüze kullanılan veri sıkıştırma teknolojilerini incelemek, dünya genelinde gerçekleştirilen çalışmalara ışık tutmak ve güncel gelişmeleri kurumumuz ve ülkemiz için verimli olabilecek öneriler halinde sunmaktadır. Söz konusu genel amaca ulaşmak için belirlenen alt amaçlar ise aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- Sayısal televizyon yayıncılığının temelini oluşturan görüntü, ses ve video verilerini sıkıştırmak için kullanılan kayıpsız ve kayıplı teknolojilerin incelenerek birbirlerine göre üstün oldukları noktaların belirlenmesi

- HD görüntü teknolojisinin sayısal televizyon yayıncılığında kullanımını sağlayan H.264/AVC ve 4K görüntü teknolojisinin sayısal televizyon yayıncılığında kullanımını sağlayan H.265/HEVC teknolojilerinin tüm sıkıştırma adımları ile incelenerek karşılaştırılması

- H.265/HEVC teknolojisinin sayısal televizyon yayıncılığında tam anlamıyla kullanılması durumunda frekans spektrumuna etkisinin incelenmesi

- Dünya genelinde H.265/HEVC teknolojisi kullanılarak uydu ve karasal ortamlardan gerçekleştirilen yayınlara ilişkin parametrelerin ve elde edilen sonuçların aktarılması

Ülkemizde video sıkıştırma teknolojilerinin sayısal televizyon yayıncılığına etkisi ile H.265/HEVC video sıkıştırma ve 4K - 8K görüntü teknolojilerine ilişkin kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. H.265/HEVC video sıkıştırma teknolojisinin sayısal televizyon yayıncılığında kullanılması izleyicileri, medya hizmet sağlayıcı kuruluşları, altyapı/platform işletmecilerini, TV üreticilerini ve dolayısıyla Radyo ve Televizyon Üst Kurulu'nu yakından ilgilendirmektedir. Bu çerçevede hazırlanan tez çalışması, H.265/HEVC teknolojisini geniş kapsamlı ele alması ve bu alanda çalışacak kişilere yol göstermesi bakımından önem arz etmektedir.

Söz konusu tez çalışması, kaynak tarama (Review) yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Kaynak tarama, tüm klasik ve güncel kaynakların taranması ile ortaya konulan araştırmanın tarihsel ve bilimsel gelişimini birlikte ele alan yöntemdir.[1] Kaynak tarama yöntemi, ön ve detaylı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Ön tarama, konu başlıklarının belirlenebilmesi, detaylı tarama ise tüm ana ve yardımcı kaynakların elde edilebilmesi amacıyla gerçekleştirilmektedir.[2]

Ön tarama adımında, konuya ilişkin daha önce gerçekleştirilen çalışmalar incelenerek konu başlıkları belirlenmiş ve tezin ana çerçevesi çizilmiştir. Detaylı tarama adımında ise ITU, IEEE, EBU (European Broadcasting Union) ve ABU (Asia - Pacific Broadcasting Union) gibi uluslararası kuruluşlara ait dergilerde yayımlanan makaleler, raporlar ve standartların yanı sıra akademik veri tabanları, çevrimiçi kütüphaneler, yayımlanmış tezler ve kurumsal web siteleri taranarak güncel veriler elde edilmiştir. İlgili veriler, tezin amacı doğrultusunda bilimsel etik ve kurallara uygun olarak aktarılmıştır.

[1] Kazım Özdamar, *Modern Bilimsel Araştırma Yöntemleri*, Kaan Kitabevi, Eskişehir, 2003, s.71.
[2] Mehtap Yıldız, *Araştırmalarda Kaynak Tarama Yöntemleri*, Ankara Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005, s.3.

BİRİNCİ BÖLÜM

SAYISAL YAYINCILIK KAVRAMI VE STANDARTLARI

Televizyon yayıncılığı, geçmişten günümüze sürekli bir değişim ve gelişim içerisinde olmuştur. Günümüzde, modern ve verimli bir yöntem olan sayısal televizyon yayıncılığı tüm iletim ortamlarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak, sayısal yayıncılığın verimli olmasını sağlayan parametreler ve kullanıldığı iletim ortamlarına ilişkin detayların daha iyi kavranabilmesi amacıyla geleneksel bir yöntem olan analog televizyon yayıncılığından kısaca bahsetmek gerekmektedir.

1.1. ANALOG YAYIN

Analog sözcüğü, "eş" anlamına gelmektedir. Fransızca kökenli olan analog sözcüğünün Türkçe karşılığı olarak "örneksel ve benzer" gibi ifadeler kullanılmaktadır.[3] Analog sinyal; sürekli, doğrusal ve değişken bir yapıda olup herhangi bir zaman aralığında kesin ve net bir değeri yoktur. Net bir değeri olmamasına karşın analog sinyaller, kesintisiz ve homojen olup mükemmel yapıdadırlar. Analog sinyaller, herhangi bir ses veya görüntü için kulak veya gözle algılanamayacak en ufak detayları dahi içermektedir.

Analog sinyallerin olumlu yanlarının yanı sıra birçok olumsuz yanı da bulunmaktadır. Herhangi bir zaman aralığında net bir değeri olmamasından dolayı analog sinyallerle işlem yapmak oldukça zordur. Çünkü işlem yapıldıktan sonra sinyal tekrar oluşturulurken ilgili noktaya denk gelen sinyal değerinin ilk durumla

[3] Türk Dil Kurumu, Güncel Türkçe Sözlük.
http://www.tdk.gov.tr/index.php?option=com_gts (29.03.2016)

birebir aynı olması imkânsızdır. En ufak bir farklılık seste veya görüntüde çok ciddi bozulmalara yol açmaktadır. Analog tekniklerle oluşturulmuş veriler, iletim sırasında çok ciddi oranda bant genişliği harcamakta ve kaydedildikleri manyetik ortamda bozulmaya açık olup kopyalanmaları sırasında kayıp yaşamaktadır.

İlk defa 1900'lü yılların başında gerçekleştirilen televizyon yayını 1990'lı yıllara kadar analog teknoloji kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analog teknoloji; görüntünün üretiminden, iletimine ve alınmasına kadar televizyon yayıncılığının her aşamasında kullanılmıştır. Analog yayıncılık teknolojisi, yukarıda anlatıldığı gibi herhangi bir frekans aralığında sonsuz sayıda değer içermekte ve bu frekans aralığında ses ve görüntü bilgisinin elektromanyetik olarak aktarılması prensibine dayanmaktadır.

Analog yayıncılıkta görsel veri çeşitli voltaj seviyeleriyle taşınmaktadır. Siyah beyaz video sinyalinde tam siyah için 0 Volt, tam beyaz için 0.7 Volt belirlenmiştir. Gri tonlar, tam siyah ve tam beyaz için belirlenen voltaj seviyeleri arasında değer almakta ve ilgili görüntünün tanımlaması yapılmaktadır. Her ton için belirlenen voltaj değeri sayesinde görüntünün üretilme, iletilme ve alınma süreçlerinde tonların iç içe geçmesi önlenmekte ve görüntüdeki kayıp azaltılmaktadır.[4]

Analog yayıncılıkta TV vericileri kullanılmakta ve yayın sinyali genlik modülasyonu kullanılarak kuvvetlendirilmektedir. Yayın sistemi olarak VHF (174-230 MHz) ve UHF (470-790 MHz) frekans aralıklarında, VHF için 7 MHz'lik; UHF için 8 MHz'lik bant genişlikleri kullanılmaktadır. Ayrıca, analog yayıncılık için Band I olarak adlandırılan 47-69 MHz frekans aralığı da kullanılmaktadır.

Analog karasal yayıncılık, verimliliğe göre belirlenmiş alanlara kurulan vericiler sayesinde maksimum sayıda alıcıya ulaşarak gerçekleştirilen analog

[4] Alper Gedik, *Yeni İletişim Teknolojilerinden Yüksek Tanımlamalı (HD) Yayın Sistemleri ve Odyovizüel Veri Transferindeki Pratikleşme*, Ege Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 2009, s.11.

yayıncılık tekniğidir. Alıcının yayını alabilmesi için ilgili vericiye doğru yönlendirilmiş anten kullanılmakta olup yayınlar elektromanyetik dalga şeklinde alıcıya ulaştırılmaktadır. Bu yöntem, ucuz ve basit olmasına rağmen alıcı antenin kalitesi, verici gücü ve coğrafi koşullardan (yağmur, kar, alıcı ve verici arasında herhangi bir engelin oluşması vb.) çok fazla etkilenmektedir. Ayrıca, frekans spektrumunu verimli kullanamamak gibi çok ciddi bir olumsuzluk içermektedir. Karasal yayıncılıkta frekans spektrumu dar olduğunda veya kanal sayısı çok fazla olduğunda frekans tahsisinin çok doğru yapılmış olması gerekmekte aksi takdirde ilgili kanallara ait yayınlar enterferans[5] problemiyle karşı karşıya kalmaktadır.

1.2. ANALOG YAYIN STANDARTLARI

Televizyon yayıncılığında atılan en önemli adımlardan biri renkli televizyon yayıncılığına geçiş olmuştur. Renkli televizyona geçişin aşamaları; renkli görüntüyü yakalayabilen kameraların icat edilmesi, renkli görüntünün elektrik sinyallerine dönüştürülerek iletilmesi ve televizyonun bu elektrik sinyallerini çözümleyerek izleyiciye görüntüyü sunabilmesi olarak sıralanabilmektedir. Bu çözümleme işlemi, renkli yayın gösterme yeteneğine sahip televizyonun gelen görüntüdeki parlaklık bilgisi farklarını renk bilgisine çevirerek sahip olduğu fosfor tabakası aracılığıyla ekrana yansıtması şeklinde gerçekleştirilmektedir.

Renkli televizyonun icadıyla birlikte her ülkenin kendine özgü analog televizyon yayın standardı ortaya çıkmıştır. 1948 yılında ilk renkli televizyon ABD'de icat edildiği için ilk televizyon yayın standardı ABD'ye ait NTSC standardıdır. Daha sonra NTSC'den farklı olarak Almanya ve Fransa'da kendi standartlarını geliştirmişlerdir. Almanya ülkemizde de kullanılan PAL standardını, Fransa ise SECAM standardını geliştirmiştir.[6]

[5] Enterferans: İletilmek istenilen yayının yanı sıra iletilmek istenmeyen yayınların da alıcıya ulaşması durumudur. İletilmek istenen yayın üzerinde bozucu etki yaratmaktadır.
[6] A. Hazal Köse, *Gelişen TV Teknolojileri Çerçevesinde, Yerel Televizyonlar ve Sayısal Yayıncılık*, Ege Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 2011, s.17.

1.2.1. NTSC (National Television Systems Committee)

Analog televizyon standardı olan NTSC, 1941 yılında siyah-beyaz televizyonlar için Amerikan NCB ve RBA şirketleri tarafından geliştirilmiştir. 1948 yılında renkli televizyonun icadından sonra 1953 yılında NTSC standardı renkli televizyonlar için uyumlu hale getirilmiştir. Standardın farklı sürümleri geliştirilmiş olsa da bütün sürümler, 525 yatay çizgiye ve saniyede 30 kare gösterme hızına sahiptir.

NTSC, diğer analog yayın standartlarında olduğu gibi RGB olarak bilinen bir yöntem kullanmaktadır. RGB yöntemi, üç ana renk olan kırmızı, yeşil ve mavinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla diğer renklerin elde edilebilmesi prensibine dayanmaktadır. NTSC, RGB yöntemi kullanarak elde ettiği renk bilgilerini alıcıya tek bir bilgi olarak gönderir ve alıcı tarafından bu bilgi çözülerek ilgili görüntü ekrana yansıtılır.[7]

NTSC standardı, ABD tarafından geliştirilmiş olsa da özellikle Kuzey ve Güney Amerika ülkelerinin hemen hemen hepsinde, Uzakdoğu ülkelerinde (Japonya, Tayvan, Güney Kore, Bruma vb.) ve birkaç pasifik ülkesinde kullanılmaktadır. Japonya tarafından kullanılan standart NTSC-J olarak adlandırılmaktadır. NTSC standardının genel özellikleri Tablo 1.1'de gösterilmektedir.[8]

Tablo 1.1 NTSC standardının genel özellikleri

Standart	**NTSC**
Satır/Alan	525
fps	30
Yatay Frekans	15,734 kHz
Dikey Frekans	60 Hz
Video Bant Genişliği	4,2 MHz
Ses Taşıyıcısı	4,5 MHz

[7] MEGEP, *Radyo-Televizyon Yapım ve Yayıncılığı: Televizyon Yayıncılığının Temelleri*, MEB Yayınları, Ankara, 2006, s.11.
[8] A.H. Köse, 2011, s.18.

1.2.2. PAL (Phase Alternation Line)

Pal standardı, Telefunken şirketinde çalışan Walter Brunch tarafından 1962 yılında Almanya'da geliştirilmiştir. Dünya üzerinde en fazla kullanılan analog yayın standardıdır. Standardın farklı sürümleri geliştirilmiş olsa da bütün sürümler, 625 yatay çizgiye ve saniyede 25 kare gösterme hızına sahiptir. PAL standardı, tarihinden de anlaşılacağı üzere NTSC'den sonra geliştirilmiş ve PAL standardı ile NTSC'deki eksikliklerin giderilmesi amaçlanmıştır. NTSC standardı; hava koşullarından, yayının aktarımı sırasındaki alçak frekans bileşenlerinden çok fazla etkilenmekte ve yayın alıcıya ulaşana kadar renk kaymaları yaşamaktadır. PAL standardının ana çıkış noktası, bu olumsuzlukların önüne geçmek olmuştur. İlk PAL yayınları 1964 yılında İngiltere'de daha sonra 1967 yılında Almanya'da iletilmiştir.

PAL, Avrupa'da Fransa'nın geliştirmiş olduğu SECAM standardı ile beraber kullanılmış olsa da Avustralya, Arjantin, Ortadoğu ülkeleri, Afrika'nın bazı kısımlarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde de yayıncılığın ilk dönemlerinde Almanya'dan alınan teknik destek dolayısıyla PAL standardı kullanılmaktadır. PAL standardının PAL-B/G/H, PAL-I, PAL-D, PAL-N ve PAL-M olmak üzere 5 farklı sürümü bulunmaktadır. PAL-B/G/H Batı Avrupa ülkelerinde; PAL-I İngiltere'de; PAL-D Doğu Avrupa ülkeleri ve Çin'de; PAL-M Brezilya'da; PAL-N ise Uruguay ve Paraguay'da kullanılmaktadır. Tablo 1.2'de çeşitli ülkelerin kullanmış olduğu farklı PAL sürümlerine ilişkin teknik detaylar gösterilmektedir.[9]

Tablo 1.2 PAL standardı sürümlerinin genel özellikleri

Standart	PAL-B/G/H	PAL-I	PAL-D	PAL-N	PAL-M
Satır/Alan	625/50	625/50	625/50	625/50	625/60
fps	25	25	25	25	30
Yatay Frekans	15,625 kHz	15,625 kHz	15,625 kHz	15,625 kHz	15,625 kHz
Dikey Frekans	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Video Bant Genişliği	5,0 MHz	5,5 MHz	6,0 MHz	4,2 MHz	4,2 MHz
Ses Taşıyıcısı	5,5 MHz	6,0 MHz	6,5 MHz	4,5 MHz	4,5 MHz

[9] a.g.t., s.20.

Tablo 1.2'den de anlaşılacağı üzere PAL standardına ait videobant genişliği ve ses taşıyıcısı frekans aralığı NTSC standardına göre daha yüksek seviyededir. Daha geniş frekans aralığı, hem sesin hem de görüntünün daha kaliteli iletilebilmesine imkân sağlamaktadır.

1.2.3. SECAM (Séquentiel Couleur Àvec Mémoire)

Avrupa'nın ilk renkli televizyon standardı olan SECAM, 1956 yılında Henri de France tarafından NTSC standardı temel alınarak Fransa'da geliştirilmiştir. Standardın farklı sürümleri geliştirilmiş olsa da bütün sürümler, 625 yatay çizgiye ve saniyede 25 kare gösterme hızına sahiptir. SECAM, PAL ve NTSC standartları kadar yaygın kullanılmamaktadır. SECAM standardının, SECAM-L, SECAM-B/G, SECAM-D/K, SECAM-K olmak üzere 4 farklı sürümü bulunmaktadır. SECAM-L Fransa ve Lüksemburg'da, SECAM-B/G Orta Asya ülkeleri ve Yunanistan'da, SECAM-D/K bazı doğu Avrupa ülkelerinde, SECAM-K Fransa'nın sömürge ülkelerinde kullanılmaktadır. Tablo 1.3'te çeşitli ülkelerin kullanmış olduğu SECAM sürümlerine ilişkin teknik detaylar gösterilmektedir.[10]

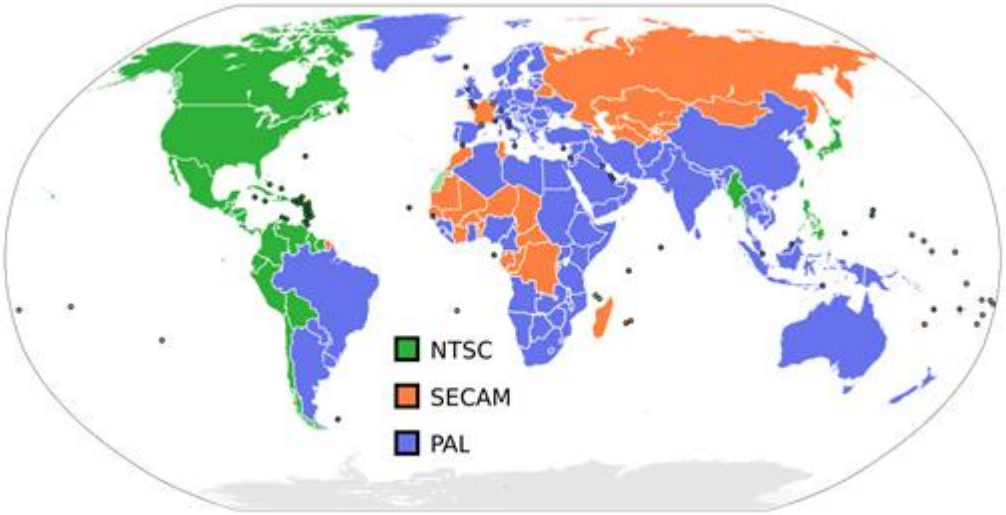
Tablo 1.3 SECAM standardı sürümlerinin genel özellikleri

Standart	**SECAM-B/G/H**			**SECAM-D/K//L**	
Satır/Alan	625/50	625/50	625/50	625/50	525/60
fps	25	25	25	25	30
Yatay Frekans	15,625 kHz	15,625 kHz	15,625 kHz	15,625 kHz	15,750 kHz
Dikey Frekans	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Video Bant Genişliği	5,0 MHz	5,5 MHz	6,0 MHz	4,2 MHz	4,2 MHz
Ses Taşıyıcısı	5,5 MHz	6,0 MHz	6,5 MHz	4,5 MHz	4,5 MHz

Tablo 1.3'ten de anlaşılacağı üzere farklı SECAM sürümlerine ait videobant genişliği ve ses taşıyıcı frekansı değerleri farklılık göstermektedir. Fakat yatay çizgi sayısı ve saniyede gösterilen kare sayısı (fps) aynıdır.

[10] a.g.t., s.21.

Geçmişten günümüze ülkelerin tercih etmiş oldukları analog televizyon standartları değişiklik göstermiştir. NTSC, ilk geliştirilen olması; PAL ise gelişmiş olması nedeniyle dünya genelinde en çok kullanılan standartlardır. Şekil 1.1'de farklı ülkelerin kullanmış olduğu analog yayın standartları harita üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Dünya ülkelerinde NTSC, PAL ve SECAM standartlarının kullanımı [11]

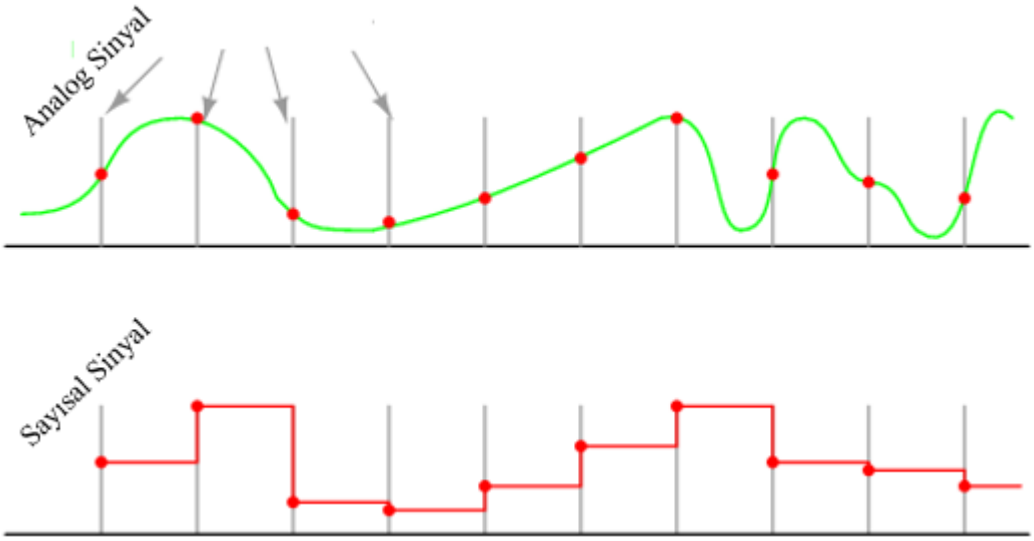
Analog yayın teknolojileri 1990'lı yıllara kadar yoğun olarak kullanılmış ancak bilgisayar ve sayısal sistemlerin gelişimiyle beraber yerini sayısal yayın teknolojilerine bırakmıştır. Analog teknoloji kullanılarak oluşturulan yayınların üzerinde işlem yapılmasının zorluğu, iletimi sırasında coğrafi faktörlerden ciddi oranda etkilenmesi, kopyalanması sırasında bilgi kaybının yaşanması gibi etkenlerin yanı sıra izleyicilerin daha kaliteli ses ve görüntü talebi sayısal tabanlı yayıncılığa geçişi hızlandırmıştır.

1.3. SAYISAL YAYIN

Dijital sözcüğü Latince kökenli olup "parmak" anlamına gelen "digit" kelimesinden türetilmiştir. Türkçe karşılığı olarak "parmakla sayılabilen her şey, örneklenmiş, basamaklanmış, sayısal" gibi ifadeler kullanılmaktadır. Sayısal sinyal,

[11] https://en.wikipedia.org/wiki/PAL (14.06.2015)

herhangi bir zaman aralığında kesin ve net bir değere sahip olup analog sinyallerde olduğu gibi sürekli değil kesiklidir. Analog ve sayısal sinyal arasındaki fark Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2 Analog ve sayısal sinyal [12]

Sayısal sistemlerin gelişimi, 1950'li yıllarda temeli sayısal mantığa dayanan bilgisayarların icat edilmesiyle başlamıştır. Bu tarihten itibaren analog sistemler yerini yavaş yavaş sayısal sistemlere bırakmıştır. Bu dönüşüm, analog sistemlerin aksine sayısal sistemlerin; manyetik ortamlarda bozulmaya karşı dayanıklı olması, kopyalanması sırasında kayıp yaşanmaması, coğrafi koşullardan etkilenmemesi, sinyallerde yapılan değişikliklerin sinyalde bozulma yaratmaması, hızlı ve pratik olması gibi sebeplerden kaynaklanmaktadır.

Sayısal sistemlerin gelişmesiyle birlikte analog televizyon yayıncılığı da yerini sayısal televizyon yayıncılığına bırakmıştır. 1990'lı yılların başına doğru izleyicilerin daha kaliteli ve sorunsuz yayın izleme arzusu dünya genelinde sayısal televizyon yayıncılığı çalışmalarının başlamasına vesile olmuştur.

[12] https://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/Digital/DIGI_13.html (18.06.2015)

Sayısal sistemlerin ve sayısal televizyon yayıncılığının avantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.[13]

- Analog teknolojiye göre ses, görüntü ve video kalitesi ciddi oranda artmaktadır.
- Televizyon yayıncılığı, etkileşimlilik unsurunun gelmesi ile tek taraflı olmaktan çıkarak iki yönlü bir iletişim tekniğine dönüşmektedir.
- Analog görüntü, ses ve videolar manyetik ortamlardan ciddi oranda etkilenmekte fakat sayısal görüntü, ses ve videolar manyetik ortamdan neredeyse hiç etkilenmemektedir.
- Analog yayınların kopyalanması sırasında kayıplar yaşanmakta fakat sayısal tabanlı yayınlardan binlerce kopya alınsa dahi kayıp yaşanmamaktadır.
- Sayısal yayıncılık, yeni teleteks sistemi EPG (Elektronik Program Rehberi) özelliği ile resim, video ve yazı indirebilme imkânı sunmaktadır.
- Analog yayıncılık mobil yayın alış için uygun değildir. Sayısal yayıncılıkta ise yansımalar yayına kuvvetlendirici etki yaptığı için mobil yayın alış için uygundur.
- Analog yayıncılıkta iki ayrı verici eş kanaldan aynı bölgeye enterferans problemi yüzünden yayın yapamaz. Sayısal yayıncılıkta ise SFN (Single Frequency Network) tekniği ile iki ayrı vericiden eş kanal kullanılarak aynı bölgeye yayın yapılabilmektedir.

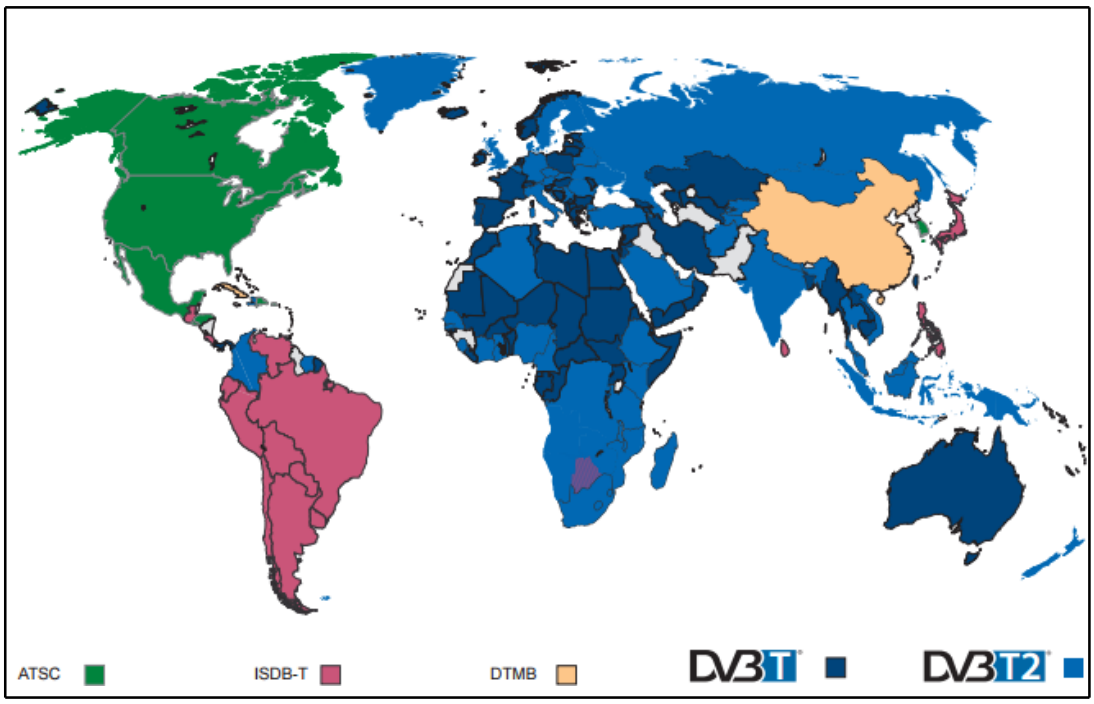
Bu tez kapsamında en dikkat çekici madde, "*sayısal teknoloji ile birlikte görüntü, ses ve video kalitesi ciddi oranda artmaktadır*." ifadesidir. Bu durum, ilgili formatların veri boyutlarının da ciddi oranda artmasına neden olmuştur. Veri boyutlarının artmasıyla beraber ilgili formatların iletilebilmesi ve depolanabilmesi zor bir hal almış ve bu yüzden kayıplı veri sıkıştırma teknolojileri geliştirilmiştir.

[13] Oktay Sirrik, "Digital Video Broadcasting Neden, Nasıl?", s.5-7. http://www.satturkey.com/download/makale.pdf (17.06.2015)

1.4. SAYISAL YAYIN STANDARTLARI

Sayısal televizyon yayıncılığı konusunda özellikle Avrupa, Japonya ve ABD tarafından çok kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Avrupa'da DVB (Digital Video Broadcasting), Japonya'da ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting) ve ABD'de ATSC (Advanced Television System Committee) projeleri yürütülmüştür.

Bu çalışmaların ilki ve en kapsamlısı Avrupa ülkeleri tarafından yürütülen DVB projesi olmuştur. 1990'lı yılların başında DVB projesi ile birlikte Avrupa ülkeleri ve başta ITU, IEEE, EBU olmak üzere binlerce bağımsız kuruluş tarafından sayısal televizyon yayıncılığının temelleri atılmıştır. Bu proje kapsamında her ortamda yapılan yayıncılık türleri (uydu, kablo, karasal, IP TV, Web TV) sayısal standartlara bağlanmıştır. Günümüzde ülkelerin neredeyse tamamı sayısal tabanlı sistemler kullanmaktadır. Dünya genelinde kullanılan sayısal yayıncılık standartlarının dağılımı Şekil 1.3'te harita üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 1.3 Dünya genelinde DVB, ATSC ve ISDB standartlarının kullanımı [14]

[14] https://www.dvb.org/news/worldwide (18.06.2015)

1.5. SAYISAL YAYINCILIKTA KULLANILAN İLETİM ORTAMLARI

Sayısal yayınlar karasal, kablo, uydu, mobil, IP TV, Web TV gibi çok çeşitli ortamlardan izleyicilere ulaştırılmaktadır. Karasal, kablo ve uydu ortamları analog teknoloji döneminde de kullanılmış ancak sayısal yayıncılık standartlarının tamamlanmasıyla birlikte bu ortamlara ilişkin yeni düzenlemeler yapılmıştır. Karasal ortamdan iletilen yayınlar DVB-T, kablo ortamından iletilen yayınlar DVB-C ve uydu ortamından iletilen yayınlar DVB-S standartları ile yeniden düzenlenmiştir. IP TV, Web TV ve mobil ortamlardan yapılan yayıncılık (DVB-H) ise sayısal teknolojinin gelişimiyle beraber ortaya çıkmıştır. DVB standardının dışında ATSC ve ISDB standartları da farklı ortamlara ilişkin yeni düzenlemeler yapmıştır. Bu bölümde, dünya genelinde daha fazla kullanılması ve kapsamlı olmasından dolayı DVB standardına ilişkin iletim ortamları ele alınmaktadır.

1.5.1. Sayısal Karasal Yayıncılık

Avrupa ülkelerinde olduğu gibi ülkemizde de sayısal karasal yayıncılık standardı olarak DVB-T teknolojisi kabul edilmiştir. Ülkemizde 2006 yılında TRT (Türkiye Radyo ve Televizyon Kurumu) tarafından sayısal karasal yayıncılıkla ilgili deneme yayınları başlamıştır.

Her ne kadar sayısal tabanlı sistemler gelişmiş olsa da günümüzde çoğu TV alıcıları analog yapıdadır. Dolayısıyla sayısal olarak gönderilen yayınların alıcılar tarafından alınabilmesi için alıcılarda “set top box” adı verilen set üstü kutuların bulunması gerekmektedir. Set üstü kutular vericilerden gelen sayısal yayınları çözümleyerek yayınların ekranda yansıtılmasını sağlamaktadır. Bu izleyiciler için bir maliyet oluştursa da karasal sayısal yayıncılık sistemi, uydu aracılığıyla izlediğimiz kalitede yayını daha ucuz ve verimli bir şekilde sunmaktadır.

Sayısal karasal yayıncılık, analog karasal yayıncılığa göre çok ciddi avantajları beraberinde getirmektedir. Bölüm 1.3'te anlatılan özelliklerin yanı sıra sayısal karasal yayıncılıkta frekans spektrumu analog karasal yayıncılığa göre daha verimli kullanılmaktadır. Analog karasal yayıncılıkta; UHF bandında 8 MHz'lik, VHF bandında 7 MHz'lik bant genişliklerinden tek bir analog TV yayını iletilebilirken sayısal karasal yayıncılıkta aynı bant genişliklerinde 4 - 6 adet sayısal TV yayını iletilebilmektedir.[15]

DVB - T'nin devamı niteliğinde ve ikinci nesil olarak adlandırılan DVB - T2 teknolojisi 2008 yılında geliştirilmiştir. Ülkemizde de 2012 yılında Radyo ve Televizyon Üst Kurulu tarafından hazırlanan Ulusal Sayısal Karasal Frekans Planı'nda DVB - T2 teknolojisi kabul edilmiştir.

1.5.2. Sayısal Kablo Yayıncılığı

Kablolu yayıncılık, analog teknoloji döneminde de kullanılan bir yayıncılık türüdür. 1990'lı yıllarda DVB standardının tamamlanmasıyla birlikte DVB-C ismiyle sayısal olarak standart haline getirilmiştir. Ayrıca, 2008 yılında DVB - C'nin devamı olarak nitelendirilen ikinci nesil DVB - C2 teknolojisi geliştirilmiştir.

Kablo yayıncılığı, analog veya sayısal yayın yapan birçok yerli ve yabancı kanalı tek merkezde toplayarak, burada çeşitli işlemlerin ardından fiber optik veya koaksiyel kablolar aracılığıyla kullanıcılara taşıyan bir sistemdir.[16]

Kablo yayıncılığında, uydu yayıncılığında olduğu gibi uydu alıcısı ve çanak anten vb. araçlara ihtiyaç yoktur. Bunun yanı sıra eve ulaşan kablolar çoğullanarak birden fazla televizyona bağlanabilmektedir.[17]

---

[15] A.H. Köse, 2011, s.79.

[16] Cüneyt Korkut, *Yeni İletişim Teknolojilerinin Televizyon Yayıncılık Sistemlerinde Kullanımı: Atatürk Üniversitesi Televizyonu Örneği*, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, 2013, Erzurum, s.22.

Kablo yayıncılığı RF sinyalleri ile 1000 MHz'e kadar olan bant aralığını kullanarak TV ve radyo yayınlarının taşınabildiği bir platformdur. Türkiye'de kablolu yayıncılık sistemi, 1991 yılında PTT tarafından kurulmuştur. O dönem 118-450 MHz aralığında 40 analog kanal kapasitesi ile 9 ilde hizmet vermeye başlamıştır. Daha sonra sırasıyla 600 MHz ve 860 MHz'e kadar çalışacak şekilde iyileştirilmiş ve analog kanal kapasitesi 95 kanala kadar çıkmıştır. 2008 yılına kadar TÜRKSAT uyduları tarafından alınan sayısal yayınların analog dönüşümü gerçekleştirilerek kablo TV dağıtım merkezlerine oradan da kullanıcılara ulaştırılmıştır. Ancak 2008 yılı sonlarına doğru kablolu TV altyapısı da sayısal sisteme geçmiştir.[18]

Sayısal kablo yayıncılığı, analog kablo yayıncılığa göre çok ciddi avantajları beraberinde getirmektedir. Bölüm 1.3'te anlatılan özelliklerin yanı sıra sayısal kablo yayıncılığında frekans spektrumu analog kablo yayıncılığa göre daha verimli kullanılmaktadır. Analog kablo yayıncılığında; tek bir kanalın iletimi için gerekli olan bant genişliğinden sayısal kablo yayıncılığında 8 SD ve 2 - 3 HD yayın iletilebilmektedir. Ayrıca, analog kablo yayıncılığı döneminde TÜRKSAT tarafından alınan sayısal yayınlar analog dönüşüm yapılarak kablo TV dağıtım merkezlerine oradan da kullanıcılara iletilmekteyken sayısal kablo yayıncılığına geçişle birlikte TÜRKSAT tarafından alınan sayısal uydu yayınları dönüşüme gerek kalmadan kullanıcılara direkt olarak sayısal olarak iletilebilmektedir.

1.5.3. Sayısal Uydu Yayıncılığı

Uydu yayıncılığı analog teknoloji döneminde de kullanılan bir yayıncılık türüdür. 1990'lı yıllarda DVB standardının tamamlanmasıyla birlikte DVB-S ismiyle sayısal olarak standart haline getirilmiştir. Ayrıca, 2003 yılında DVB - S'nin devamı

---

[17] a.g.t., s.22.
[18] Önder Özdemir, "Türkiye'deki Kablolu TV Teknolojileri", *Broadcasterinfo Dergisi*, Sayı: 57, 2008. http://www.tilda.com.tr/arsiv/makal_kablolutv.pdf (25.06.2015)

olarak nitelendirilen DVB - S2 ve 2014 yılında DVB - S2x teknolojileri geliştirilmiştir.

Uydu teknolojisinin geçmişi, yaklaşık elli yıl öncesine dayanmaktadır. İlk olarak 1957 yılında Sovyetler Birliği'nin üretmiş olduğu Sputnik 1 isimli uydu, 1 yıl sonra ise ABD tarafından üretilmiş Explorer isimli uydu uzaya fırlatılmıştır. Ancak bu uyduların hiçbiri haberleşme amacıyla kullanılmamıştır.

Dünyada uydu yayıncılığı konusunda atılmış en büyük adım, 20 Ağustos 1964'te çok sayıda ülkenin bir araya gelmesiyle oluşturulmuş INTELSAT (International Telecommunications Satellite Organization) organizasyonudur. INTELSAT organizasyonun kurulmasından sonra 1965 yılında ilk haberleşme uydusu olan Early Bird uzaya fırlatılmıştır. Early Bird aracılığıyla ilk kez uydu üzerinden renkli televizyon yayını yapılmıştır. Ülkemiz ise 1968 yılında INTELSAT organizasyonuna üye olmuştur.

Dünya genelinde uydu yayıncılığının çok önemli hale gelmesi dolayısıyla Türkiye 24 Ocak 1994 tarihinde TÜRKSAT 1A uydusunu uzaya fırlatmış ancak TÜRKSAT 1A uydusu fırlatıldıktan kısa bir süre sonra düşmüştür. Bunun üzerine Türkiye 11 Ağustos 1994 tarihinde TÜRKSAT 1B isimli ikinci uydusunu fırlatmıştır. Söz konusu uydu Türkiye, Ortadoğu ve Orta Asya olmak üzere 3 farklı alana yayın yapmıştır. İkinci uydu fırlatılma işleminin başarıyla sonuçlanmasının ardından Türkiye 10 Temmuz 1996 tarihinde TÜRKSAT 1C isimli çok daha geniş bir alanı kapsayan üçüncü uydusunu göndermiştir. Birinci nesil uydulardan yüksek verim alındıktan sonra Türkiye 1 Şubat 2001 tarihinde ikinci nesil TÜRKSAT 2A uydusunu uzaya fırlatmıştır. Daha sonra sırasıyla 13 Haziran 2008 tarihinde TÜRKSAT 3A, 14 Şubat 2014 tarihinde TÜRKSAT 4A ve 16 Ekim 2015 tarihinde TÜRKSAT 4B uyduları fırlatılmıştır.[19]

[19] A. Murat Kınık, "Sayısal Uydu Teknolojisinin Gelişimi ve Türkiye'de Yayıncılığın Geleceği", *Akademik Bakış Dergisi*, Sayı: 41, 2014, s.5-7.

Uydu yayıncılığının temel mantığı, TV yayın stüdyolarında üretilen sinyallerin dünya yörüngesindeki uydulara gönderilerek, yine aynı uydular üzerinden ilgili sinyallerin çanak antenler aracılığıyla alınarak ev ve işyerlerindeki televizyonlar aracılığıyla görüntülenmesidir. Karasal yayıncılıkta vericilerin kapsama alanına girmeyen bölgeler uydu yayıncılığı sayesinde çok rahat bir şekilde yayın alabilme imkânına kavuşmaktadır.

Sayısal uydu yayıncılığı, analog uydu yayıncılığa göre çok ciddi avantajları beraberinde getirmektedir. Bölüm 1.3'te anlatılan özelliklerin yanı sıra sayısal uydu yayıncılığında frekans spektrumu analog uydu yayıncılığa göre daha verimli kullanılmaktadır.

Sayısal uydu yayıncılığında kullanılan frekans aralığının diğer ortamların kullanmış olduğu frekans aralıklarına oranla daha esnek olması günümüzde sayısal uydu yayıncılığının dünya genelinde yoğun olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Yayıncılar için daha pratik ve ucuz olmasından dolayı çoğu yayıncı sayısal uydu yayıncılığını tercih etmektedir. İzleyiciler içinse ucuz olmasının yanı sıra karasal ve kablo yayınına göre daha fazla kanal izleme imkânı sunmasından dolayı tercih edilmektedir. Ayrıca, H.264/AVC ve H.265/HEVC sıkıştırma teknolojilerinin geliştirilmesiyle beraber, artan HD TV ve UHD TV yayınları sayısal uydu yayıncılığı aracılığıyla verimli bir şekilde izleyiciye iletilmektedir.

1.5.4. Mobil Cihazlarda Sayısal Televizyon Yayıncılığı

Mobil cihazlarda sayısal televizyon yayıncılığı, 2004 yılında ETSI (European Telecommunications Standard Institute) tarafından DVB - H ismiyle standart haline getirilmiştir. Günümüzde yaygın kullanım şekli, Mobil TV olarak geçmektedir. Tamamen sayısal tabanlı bir sistem olan Mobil TV, analog karasal yayınları alabilen mobil cihazların çalışma mantığıyla karıştırılmamalıdır.

Sayısal yayıncılık ile hayatımıza giren etkileşimlilik ilkesi, Mobil TV'nin en önemli unsurlarındandır. Bunun yanı sıra, diğer sayısal yayıncılık sistemlerinin hiç birisinde bulunmayan taşınabilirlik ilkesi Mobil TV'yi bambaşka bir noktaya taşımaktadır.

Yayınların mobil cihazlara ulaştırılabilmesi için 3 farklı yol kullanılmaktadır. Her bir yöntemin kendine özgü farklı kaynak kullanımı, kapasite ve iş modeli bulunmaktadır.

Mobil TV yayınlarının alıcılara ulaşması için kullanılan birinci yol uydu vericileridir. Mobil Uydu Hizmetleri (MSS) için frekans spektrumunda S-Band olarak adlandırılan bölüm kullanılmaktadır. Bu yöntemle 256 kbit/s bant genişliğinde yayınlanması şartıyla her bir verici üzerinden 9 kanal yayın yapabilmektedir.[20]

Mobil TV yayınlarının alıcılara ulaşması için kullanılan ikinci yol DVB-H teknolojisi ile daha düşük kapasitede vericilerle L bandından 8 MHz kanal genişliğinde yapılan yayınlardır. Bu yöntemle 256 kbit/s bant genişliğinde yayınlanması şartıyla her bir verici üzerinden 45 kanal yayın yapabilmektedir.[21]

İlk iki yolla yapılan iletim, broadcast ve multicast olarak adlandırılmakta olup iletim esnasında kapsama alanında olan herkes tarafından izlenebilmektedir. Bu yöntemlerden farklı olarak kullanılan üçüncü yöntem ise mobil şebekelerin kullanmış oldukları geniş bant kanallarıdır. Üçüncü yöntem ise unicast olarak adlandırılmaktadır. Mobil şebekelerin seçmiş oldukları sınırlı kitleye yapmış oldukları yayındır. Bu yolla yapılan iletimde 2G,3G ve 4G gibi hücresel ağlar kullanılmaktadır.[22]

[20] C. Korkut, 2013, s.24.
[21] Tolga Yaveroğlu, *Sayısal TV Yayıncılık,* Teknoloji, Medya ve Telekomünikasyon Sektörü, Deloitte Türkiye Yayıncılık, İstanbul, 2011, s.31'den aktaran a.g.t., s.25.
[22] Tolga Yaveroğlu, *Sayısal TV Yayıncılık,* Teknoloji, Medya ve Telekomünikasyon Sektörü, Deloitte Türkiye Yayıncılık, İstanbul, 2011, s.33'den aktaran, C. Korkut, 2013, s.24.

Sayısal teknoloji sayesinde Mobil TV hizmetlerinin kullanımı artış gösterse de günümüzde mobil hizmetler için ayrılan bant genişliğinin yetersiz olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, mevcut teknoloji ile üretilmiş mobil cihazların gerek ekran boyutu gerekse batarya süreleri gibi olumsuzluklar nedeniyle çok verimli olmayacağı değerlendirilmektedir. Bu gibi sebeplerden ötürü Mobil TV erişimleri daha çok sınırlı kullanıcıya hitap eden unicast yöntemiyle gerçekleştirilmektedir.

1.5.5. IPTV Yayıncılığı

IPTV, internet protokolü üzerinden yapılan sayısal televizyon yayını olup temelde TV yayınlarının İnternet Protokol (IP) sinyallerine dönüştürülerek kullanıcılara ulaştırılması işlemidir. IPTV, kapalı bir altyapıya sahip olup herhangi bir TV yayınının internet ağı üzerinden aktarılması gibi düşünülmemelidir. IPTV yayınlarının abonelere aktarılması IP tabanlı kişiye özel ve güvenilir ağlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. IPTV kullanıcı seçeneklerinin ve tercihlerinin takibini de sağlamakta dolayısıyla kişiye özgü e-ticaret ve reklamın yapılabilmesi için ideal bir ortam sunmaktadır.[23]

IPTV yayınları karasal, kablo ve uydu ortamı aracılığıyla iletilen yayınlardan farklıdır. Karasal, kablo ve uydu yayıncılığı, tüm kanalların aynı anda son kullanıcıyla ulaştırılması prensibine dayanmaktadır. IPTV yayıncılığında ise sadece aboneler tarafından belirlenen kanalların iletimi gerçekleştirilmektedir.[24] Karasal, kablo ve uydu yayıncılığında (geleneksel iletim ortamları) herhangi bir servis kalitesi garanti edilmezken IPTV yayıncılığında servis kalitesi garanti edilmektedir.

[23] Svs Telekom & Satellite Systems, "IPTV Tanım ve Genel Bakış", 2008, s.1-7. www.satturkey.com/makale/IPTV.pdf (28.06.2015)
[24] a.g.k., s.1-7.

1.5.6. Web TV Yayıncılığı

Web TV diğer adıyla İnternet TV; canlı TV yayınları, çeşitli platformlar tarafından oluşturulan içerikler ve bireylerin ilgili platformlara atmış oldukları videoların internet ortamından izlenebilmesini sağlamaktadır.

Web TV, internete bağlanılabilen her yerden bilgisayarlar veya mobil cihazlar aracılığıyla rahatlıkla izlenebilmektedir. Puhu TV, Blu TV ve Youtube gibi platformların canlı veya arşivden yapmış oldukları yayınlar en iyi Web TV örneklerindendir. İlgili platformların yanı sıra artık kişiye özel Web TV hizmeti veren şirketler de kurulmuştur. İlgili şirketlerden alınan üyelikle, kişiye özel Web TV kanalından yayın yapılabilmektedir. Televizyon ve internetin yakınsaması nedeniyle Web TV günlük hayatın vazgeçilmez platformlarından birisi haline gelmiştir.

Modern yayıncılık yöntemleri olan IPTV ve İnternet TV arasındaki farklılıklar aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- IPTV yayınlarının alınabilmesi için "set top box" adı verilen set üst kutuların kullanılması gerekmektedir. İnternet TV yayınları ise televizyon, bilgisayar ve mobil cihazlar gibi çok geniş bir servis aralığında hizmet verebilmektedir.
- IPTV yayıncılığının aksine genel internet altyapısını kullanması nedeniyle İnternet TV yayıncılığında yatırım maliyeti daha azdır.
- Karasal, kablo ve uydu yayıncılığında olduğu gibi İnternet TV yayıncılığında da herhangi bir servis garantisi yoktur. Sahip olunan internet hızına bağlı olarak yayın kalitesi değişkenlik göstermektedir.
- IPTV yayıncılığı, sahip olduğu kesintisiz servis kalitesi ile İnternet TV yayıncılığı ise daha ucuz erişim olanağı sunması nedeniyle ön plana çıkmaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM

VERİ SIKIŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ

1838 yılında telgraf sistemlerinde kullanılmak üzere geliştirilen Mors Alfabesi ilk veri sıkıştırma teknolojisi olarak kabul edilmektedir. Mors Alfabesi, İngilizcede yaygın olarak kullanılan E ve T harfleri (sembolleri) için kısa kodlar, seyrek kullanılan harfler içinse uzun kodlar üretilmesi prensibine dayanmaktadır. Günümüzde çoğu sıkıştırma teknolojisinin temelinde de çok tekrar eden semboller için kısa, az tekrar eden semboller için uzun kod üretme mantığı yatmaktadır.

Bilgi teknolojileri çağının başlangıcı kabul edilen 1940 yılının sonlarına doğru modern veri sıkıştırma teknolojilerinin temeli kabul edilen Shannon-Fano kodlama, Claude Shannon ve Robert Fano tarafından geliştirilmiştir. Shannon-Fano kodlama, bir veride sembollerin bulunma olasılıklarını temel alarak kod atamakta ve böylece sıkıştırma işlemini gerçekleştirmektedir. Ayrıca David Huffman tarafından Shannon-Fano kodlama temel alınarak geliştirilen Huffman kodlama, kayıplı ve kayıpsız veri sıkıştırma teknolojilerini önemli ölçüde etkilemiştir.

Veri sıkıştırma teknolojileri, kayıplı ve kayıpsız olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kayıplı sıkıştırma teknolojileri, çıkartılması verinin bütünlüğünü kısmen etkileyecek bölümlerin çıkartılması prensibine dayanmaktadır. Kayıplı sıkıştırma teknolojilerinde, orijinal veri sıkıştırma işleminden sonra aynı şekilde geri getirilemez ve veride kayıplar oluşur. Kayıplı veri sıkıştırma işlemi, görüntü, ses veya video verilerinden insan gözünün veya kulağının algılayamayacağı yüksek frekans bileşenlerinin çıkartılması ile gerçekleştirilmektedir. Kayıplı sıkıştırma sonucunda veri boyutlarında dramatik düşüşler yaşanmaktadır.

Kayıpsız sıkıştırma teknolojileri ise, orijinal veri ile sıkıştırma sonrası elde edilen verinin birebir aynı olması prensibine dayanmaktadır. Dolayısıyla, insan gözü veya kulağının duyarlılığı ile ilgili olmayan verilerin yanı sıra görüntü, ses ve videoda en ufak bir kalite düşüşünün kabul edilemeyeceği profesyonel uygulamalarda kullanılmaktadır. Kayıpsız sıkıştırma teknolojileri, olasılık (istatistik) ve sözlük tabanlı kodlama olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Olasılık tabanlı kodlamada, sıkıştırılan verinin bütünü içinde sık tekrar eden sembollere düşük boyutta bit değerleri, az tekrar eden sembollere ise yüksek boyutta bit değerleri atanmaktadır. Huffman ve Aritmetik Kodlama, yaygın olarak kullanılan olasılık tabanlı teknolojiler arasında yer almaktadır. Sözlük tabanlı kodlamada ise, sık tekrarlanan sembol grupları belirlenerek ilgili gruba tek bir bit değeri atanmaktadır. LZ77, LZ78 ve LZW yaygın olarak kullanılan sözlük tabanlı teknolojilerdir.[25]

Veri sıkıştırma teknolojileri uygulama alanlarına göre aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- Metin tabanlı veri sıkıştırmada, her bit değerli olduğu ve veri kaybı durumunda metnin anlamı bozulacağı için kayıpsız sıkıştırma teknolojileri kullanılmaktadır. Çünkü en ufak bir veri kaybı metindeki anlamı bozmaktadır.
- Ses verisi sıkıştırma alanında, insan kulağının duyarlı olmayacağı durumlarda kayıplı sıkıştırma teknolojileri kullanılırken profesyonel uygulamalar için genellikle kayıpsız sıkıştırma teknolojileri kullanılmaktadır.
- Görüntü verisi sıkıştırma alanında, insan gözünün duyarlı olmayacağı durumlarda yani yüksek frekans bileşenlerinin yoğunlukta olduğu görüntü veya fotoğraflarda kayıplı sıkıştırma teknolojileri kullanılırken alçak frekans bileşenlerinin yoğunlukta olduğu görüntü veya fotoğraflarda kayıpsız sıkıştırma teknolojileri kullanılmaktadır.

[25] Altan Mesut, *Veri Sıkıştırmada Yeni Yöntemler*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Doktora Tezi, Edirne, 2006, s.1.

- Hareketli görüntü (video) sıkıştırma alanında, görüntü ve ses verilerinde olduğu gibi profesyonel uygulamalar dışında genellikle kayıplı sıkıştırma yöntemleri kullanılmaktadır.[26]

Veri sıkıştırma teknolojileri, verilerin daha kolay depolanması ve ağ üzerinden hızlı erişim sağlanabilmesi için yoğun olarak kullanılmaktadır. Veri sıkıştırma teknolojileri internet ağı üzerinden akan video trafiği ve yayıncılık için kritik olan frekans spektrumunun verimli kullanımı açısından oldukça önemlidir. 1990'lı yıllardan sonra gelişen sayısal yayıncılık teknolojileri ile frekans spektrumu daha verimli kullanılsa da özellikle yayın kalitesinin artmasıyla birlikte bir yayının aktarımı için gereken bant genişliği de ciddi oranda artmıştır. Bu sorunun giderilmesi için son 20 yılda veri sıkıştırma teknolojileri çok önemli gelişmeler göstermiştir.

2.1. TEMEL KAVRAM VE TEKNİKLER

Sıkıştırma teknolojilerinin verimliliğini ölçmek için sıkıştırma oranı, sıkıştırma kazancı ve entropi kavramları, sıkıştırılmış verinin kalitesini ölçmek için kullanılan MSE ve PSNR değerleri, hem kayıplı hem de kayıpsız veri sıkıştırma teknolojilerinin temelini oluşturan Huffman kodlaması ve LZW teknikleri oldukça önemlidir.

2.1.1. Sıkıştırma Oranı

Sıkıştırma oranı, sıkıştırma sonucunda elde edilen veri uzunluğuyla sıkıştırma öncesi var olan veri uzunluğunun oranını göstermekte ve Eşitlik 2.1 ile yer almaktadır.

[26] a.g.t, s.1.

$$\text{Sıkıştırma Oranı} = \frac{\text{Sıkıştırma Sonrası Elde Edilen Veri Uzunluğu}}{\text{Orjinal Veri Uzunluğu}} \times 100 \qquad \text{(E 2.1)}$$

Örnek verilecek olursa, 100 bit veri %60 oranla sıkıştırılırsa sıkıştırma sonrası elde edilen veri 60 bit olmaktadır.

2.1.2. Sıkıştırma Kazancı

Sıkıştırma kazancı, sıkıştırma sonucu veri uzunluğundan ne kadar kazanç elde edildiğini göstermekte ve Eşitlik 2.2 ile bulunmaktadır.

$$\text{Sıkıştırma Kazancı} = 100 - \text{Sıkıştırma Oranı} \qquad \text{(E 2.2)}$$

Örnek verilecek olursa, 100 bit veri %60 oranla sıkıştırılırsa sıkıştırma kazancı %40 olmaktadır (100 – 60 = 40).

2.1.3. Entropi Kavramı

Entropi kavramının kökeni, termodinamik bilimine dayanmakta ve maddenin maksimum düzensizliğe eğilimini ifade etmektedir. Entropi kavramının veri sıkıştırma teknolojilerindeki temeli, Shannon-Fano algoritmasının kurucusu Claude Shannon tarafından atılmıştır. Claude Shannon ilgili algoritmada öz bilgi kavramından söz etmektedir. Eğer bir A olayının gerçekleşme olasılığı P(A) ise, A ile ilgili öz bilgi i(A) ile ifade edilmekte ve Eşitlik 2.3 ile bulunmaktadır.[27]

$$\text{i(A)} = \log_x \frac{1}{\text{P(A)}} = -\log_x \text{P(A)} \qquad \text{(E 2.3)}$$

Logaritma ifadesinin derecesini belirleyen "x" veri sıkıştırma teknolojileri alanında işlemler ikilik sayı sistemine göre yapıldığı için 2 değerini almaktadır.

[27] a.g.t., s.4.

Öz bilgi, söz konusu bilgiyi ifade edebilmek için en az kaç bit kullanılması gerektiğini göstermektedir. Yüksek olasılığa (frekansa) sahip veriler az bilgi, düşük olasılığa (frekansa) sahip veriler çok bilgi içermektedir.

Entropi, semboller kümesine ait öz bilgilerin ağırlıklı ortalaması olup Eşitlik 2.4 ile hesaplanmaktadır.[28]

$$H = -\sum_{i=1}^{n} P(s_k)\log_2 P(s_k) \qquad \text{(E 2.4)}$$

Bu formülde yer alan n, kodlanacak veride yer alan sembol sayısıdır. $P(s_k)$ ise k. sembolün veride bulunma olasılığıdır. 2.4 numaralı eşitlikten de görüleceği üzere verinin sahip olduğu bilgi arttıkça entropi artmaktadır.

Ör 1: "KALABALIK" sözcüğünün entropi değeri, Eşitlik 2.5'te gösterilen olasılık dağılımlarının Eşitlik 2.4'e uygulanması sonucu 2.19 bit olarak bulunmaktadır.

$$P(K) = \frac{2}{9}, P(L) = \frac{2}{9}, P(A) = \frac{3}{9}, P(B) = \frac{1}{9}, P(I) = \frac{1}{9} \qquad \text{(E 2.5)}$$

$$H = -\left[\left(\frac{2}{9}\log_2\frac{2}{9}\right) + \left(\frac{2}{9}\log_2\frac{2}{9}\right) + \left(\frac{3}{9}\log_2\frac{3}{9}\right) + \left(\frac{1}{9}\log_2\frac{1}{9}\right) + \left(\frac{1}{9}\log_2\frac{1}{9}\right)\right] = 2{,}19 \text{ bit} \qquad \text{(E 2.6)}$$

Entropi, herhangi bir veriye ait sembolün sıkıştırma olmadan kodlanabileceği minimum bit değerini göstermektedir. Dolayısıyla "KALABALIK" sözcüğüne ait sembollerden her birinin sıkıştırma olmadan kodlanabilmesi için en az 2,19 bit gerekmektedir.

[28] http://www.math.tau.ac.il/~dcor/Graphics/adv-slides/entropy.pdf (09.07.2015)

2.1.4. Huffman Kodlama

Olasılık tabanlı kayıpsız sıkıştırma teknolojilerinden olan Huffman kodlama, David A.Huffman tarafından 1952 yılında geliştirilmiştir. Huffman kodlama, her sembol için çeşitli uzunluklarda kod üretmektedir. Veri içerisinde az tekrar eden semboller için uzun kodlar, çok tekrar eden semboller için kısa kodlar ikilik sisteme göre oluşturulmaktadır. Huffman kodlama, genellikle metin tabanlı verileri sıkıştırmak için ve kayıplı veri sıkıştırma teknolojilerinin son adımında kullanılmaktadır.

Huffman kodlamada sıkıştırılmak istenen veriye ait sembollerin frekanslarının belirlenmesi gerekmektedir. Frekansların belirlenebilmesi için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntem, verinin diline göre sabit bir frekans tablosunun kullanılması olup ikinci yöntem ise verinin baştan sona taranarak her bir sembole ait frekansın belirlenmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Bu yöntemlerden herhangi birisi kullanılarak frekans tablosu elde edildikten sonra Huffman ağacı oluşturulur. Huffman ağacı, hangi sembolün kaç bitle temsil edileceğini belirlemektedir. Ağacı oluşturmanın çeşitli yöntemleri olsa da en basit yöntem sembollerin öncelik sırasının belirlenmesidir. Öncelik sırası yüksek olan sembol aynı zamanda frekansı (olasılığı) en düşük semboldür.

Huffman ağacı oluşturmak için takip edilecek adımlar aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.[29]

- Algoritma tarafından kullanılacak her sembol için birer yaprak düğüm, öncelik sırası eklenir.
- En yüksek önceliğe (en düşük frekansa) sahip iki düğüm toplanarak yeni bir iç düğüm oluşturulur.
- Birden fazla düğüm kalmayacak şekilde adımlara devam edilir.

[29] Lyn Turbak, *Codes and Compression: Huffman Tree Example*, Wellesley College, 2001. http://cs.wellesley.edu/~cs231/fall01/huffman-example.pdf (03.07.2015)

- Ağaç oluşturulduktan sonra yaprak düğümler ikilik sisteme göre kodlanır ve her sembole karşılık gelen kod yaprak düğümler takip edilerek bulunur.

Ör 2: Elimizde A, B, C, D, E, F sembollerinden oluşan bir metin olsun. Sembollerin metinde bulunma frekansları (yoğunlukları) Tablo 2.1'de gösterilmektedir. İlgili metin sıkıştırma öncesi ASCII (American Standard Code For Information Interchange)[30] kodlama sistemine göre kodlanarak saklanmış ve her sembol 8 bit olarak kodlanmıştır. Huffman kodlama kullanılarak metnin daha düşük veri boyutunda ifade edilmesi aşağıda sıralanan adımlar takip edilerek gerçekleştirilmektedir.

Tablo 2.1 Huffman kodlama örneğine ait sembol frekansları

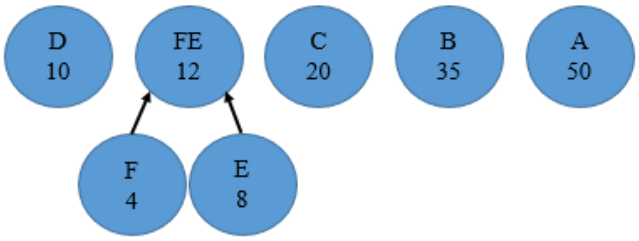
SEMBOL	SEMBOL FREKANSI
A	50
B	35
C	20
D	10
E	8
F	4

- A, B, C, D, E, F sembollerinin bulunduğu bir metin dosyasında ilgili sembollerin frekansları (veride bulunma yoğunlukları) sırasıyla 50, 35, 20, 10, 8 ve 4'tür. Huffman ağacını oluşturabilmek için bütün semboller frekanslarına göre soldan sağa (küçükten büyüğe) doğru sıralanır.

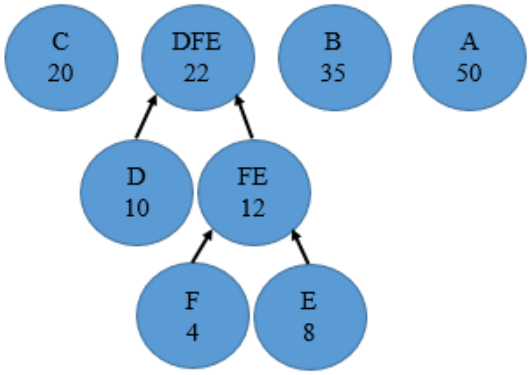


[30] ASCII: Sayısal tabanlı sistemlerde sembolleri 8 bit olarak kodlamak için kullanılan sistemdir.

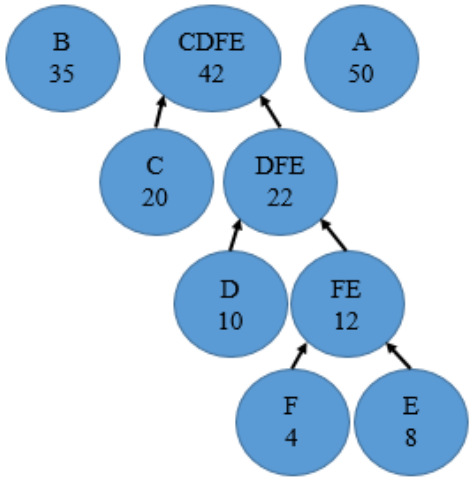
- En düşük frekansa sahip F ve E sembolleri toplanarak düğüm oluşturulmakta ve yeni düğüme ait sembol FE olarak adlandırılır.



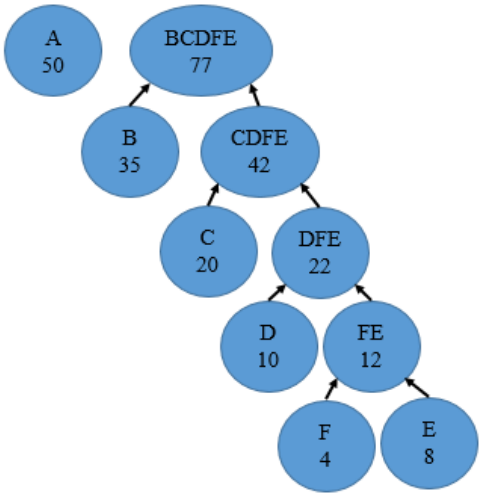
- En düşük frekansa sahip D ve FE sembolleri toplanarak yeni düğüm oluşturulmakta ve yeni düğüme ait sembol DFE olarak adlandırılır.



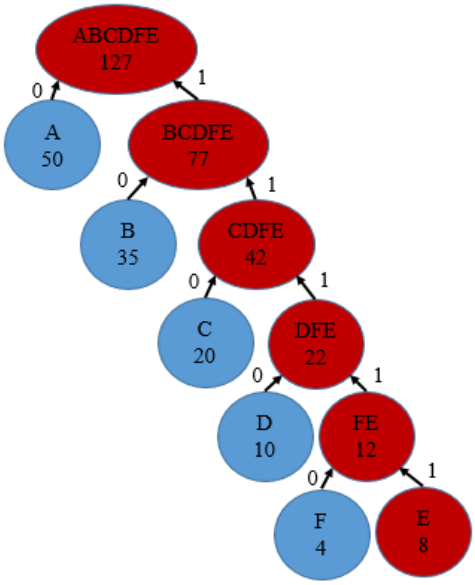
- En düşük frekansa sahip C ve DFE sembolleri toplanarak yeni düğüm oluşturulmakta ve yeni düğüme ait sembol CDFE olarak adlandırılır.



- En düşük frekansa sahip B ve CDFE sembolleri toplanarak yeni düğüm oluşturmakta ve yeni düğüme ait sembol BCDFE olarak adlandırılır.



- En düşük frekansa sahip A ve BCDFE sembolleri toplanarak yeni düğüm oluşturulmakta ve yeni düğüme ait sembol ABCDFE olarak adlandırılır. En tepede tek bir düğüm kaldığı için Huffman Ağacı oluşturma işlemi bu adımda tamamlanır. Bu adımda, ayrıca kök düğümden başlayarak soldaki düğüme 0 ve sağdaki düğüme 1 rakamı gelecek şekilde kodlama yapılır. Sırası ters yönde de olabilir ancak ilk seçilen sıranın korunması gerekir.



- Düğümlere ait işlemler yapıldıktan sonra her bir sembole ait Huffman kodu kök düğümden başlanarak ilgili sembolün takip ettiği yol yardımıyla bulunur. Huffman kodu, Tablo 2.2'de gösterilmektedir.

Tablo 2.2 Huffman kodlama örneğine ilişkin sonuçlar

FREKANS	SEMBOL	BİT SAYISI	HUFFMAN KODU
50	A	1	0
35	B	2	10
20	C	3	110
10	D	4	1110
8	E	5	11111
4	F	5	11110

Huffman kodlamanın kullanılmadığı durumlarda metne ait her bir sembol ASCII kod sistemine çevrilerek ifade edilmiştir. Toplam sembol frekans sayısı 127 ve her bir sembol için ASCII kod sistemine göre 8 bit gerektiğinden sıkıştırma olmadan bu veriyi saklamak için 1016 bit gerekmektedir ($127 \times 8 \text{ bit} = 1016 \text{ bit}$). Huffman kodlama sonrası metni ifade edebilmek için kaç bit gerektiği, sembol frekansı ile ilgili sembolün bit değerinin çarpılarak toplanması yardımıyla hesaplanmaktadır. Hesaplama, Eşitlik 2.7'de gösterilmektedir.

$$(50 \times 1) + (35 \times 2) + (20 \times 3) + (10 \times 4) + (8 \times 5) + (4 \times 5) = 280 \text{ bit} \qquad (\text{E } 2.7)$$

Entropi değeri bir verinin ifade edilebileceği minimum büyüklüğü göstermektedir. Sembollerin olasılık değerleri 3.4 numaralı denklemde yerlerine yazılırsa bu metine ait entropi değeri yaklaşık 270 bit olarak bulunmaktadır. Bu veriler ışığında Huffman kodlama sonucunda verinin ifade edilebileceği minimum veri boyutuna çok yaklaşılmıştır. (270~280) Huffman kodlama aracılığıyla 1016 bitle ifade edilebilecek metin boyutu 280 bite inmiştir. Dolayısıyla yaklaşık %72 oranında bir sıkıştırma kazancı elde edilmiştir.

2.1.5. LZW (Lempel – Ziv – Welch) Tekniği

Sözlük tabanlı kayıpsız sıkıştırma tekniği olan LZW, Abraham Lembel ve Jacob Ziv tarafından geliştirilen LZ77 ve LZ78 tekniklerinin devamı niteliğindedir. 1984 yılında Terry Welch tarafından son şekli verilerek yayınlanmıştır. LZW, esnek yapısıyla ön plana çıkmakta ve kayıpsız olarak sıkıştırılmak istenen çoğu dosya formatına uygulanabilmektedir. Genellikle metin tipinde veriler için kullanılsa da özellikle GIF görüntü formatının temelini oluşturması bakımından önemlidir.

LZW, Huffman kodlamasında olduğu gibi sembollerin frekans değerlerine göre bir kod ağacı oluşturmak yerine bir sözlük üreterek kodlama işlemini gerçekleştirmektedir. LZW, standart halde 256 adet ASCII sembolünü sözlükte otomatik olarak bulundurmaktadır. Sonrasında ise bir veride birden fazla sembolden oluşan kelime grupları için veya otomatik tanımlanan semboller için 256 ile 4096 değerleri arasında kodlama yapmaktadır.

Sıkıştırma adımları aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.[31]

- Metinden bir harf alınır.
- Seçilen harf başlangıç sözlüğünde aranır.
- Seçilen harf sözlükte varsa devamında gelen harfe bakılır.
- Sözlükte tanımlı olmayan sembole kadar bu işleme devam edilir ve karşılık gelen kodlar yazılır. Sözlükte tanımlı olan sembol kendisinden sonra gelen sembolle birlikte yeni bir sembol oluşturacak şekilde sözlüğe eklenir
- Tarama sonlanmadıysa ikinci adımdan yeni bir harf ile devam edilir.

Ör 3: **"**TOBEORNOTTOBEORTOBEORNOT#" metnini LZW tekniği ile sıkıştıracak olursak öncelikle her bir sembole karşılık gelen başlangıç sözlüğü ikilik sisteme göre oluşturulur, başlangıç sözlüğünde bulunmayan semboller sözlüğe

[31] Çağrı Şişman, *Veri Sıkıştırma ve Veri Şifreleme Algoritmalarının Ağ Üzerinde Beraber Kullanımı ve Performansının İncelenmesi*, Trakya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Edirne, 2014, s.11.

eklenir ve ikilik kodlar oluşturulur. Başlangıç sözlüğü Tablo 2.3'te gösterilmektedir.[32]

Tablo 2.3 LZW tekniği örneğine ait başlangıç sözlüğü

SEMBOL	İKİLİK SİSTEM KODU	ONDALIK SİSTEM KODU
#	00000	0
A	00001	1
B	00010	2
C	00011	3
● ● ●	● ● ●	● ● ●
Y	11001	25
Z	11010	26

- Başlangıç sözlüğünde 26 tane sembol olduğundan her bir sembol 5 bit olarak kodlanır. Sembol sayısı 31'i geçtiğinde ise her bir sembol 6 bit olarak kodlanmak zorundadır. (Başlangıç sözlüğünde yer alan 26 tane sembol İngiliz Alfabesi kullanılarak oluşturulmuştur.)

- Başlangıç sözlüğü oluşturulduktan sonra metin taranır ve başlangıç sözlüğünde olmayan semboller farklı kodlarla sözlüğe tanımlanır. Tarama yapılırken [OR] sembolünden sonra sözlükteki sembol sayısı 31'e ulaşmış olup bu adımdan sonra her sembol 6 bit olarak ifade edilmelidir. Tablo 2.4'te yeni tanımlanan sembollere ait kodlar renkli olarak gösterilmektedir.[33]

[32] https://en.wikipedia.org/wiki/Lempel-Ziv-Welch (04.08.2015)
[33] a.g.k.

Tablo 2.4 LZW tekniği örneğine ilişkin sonuç sözlüğü

Taranan Sembol	Sonraki Sembol	Çıktılar		Harici Sözlük
BOŞLUK	T	Onluk Sistem	İkilik Sistem	
T	O	20	10100	**27: TO**
O	B	15	01111	28: OB
B	E	2	00010	**29: BE**
E	O	5	00101	**30: EO**
O	R	15	01111	**31: OR**
R	N	18	10010	**32: RN**
N	O	14	001110	33: NO
O	T	15	001111	**34: OT**
T	T	20	010100	35: TT
TO	B	27	**011011**	**36: TOB**
BE	O	29	**011101**	37: BEO
OR	T	31	**011111**	38: ORT
TOB	E	36	**100100**	39: TOBE
EO	R	30	**011110**	40: EOR
RN	O	32	**100000**	41: RNO
OT	#	34	**100010**	42: OT#
		0	**000000**	Durdurma Kodu

- Tablo 2.4 dikkate alınarak semboller yeni sözlüğe göre gruplandırılır. Bu gruplamaya göre [T], [O], [B], [E], [O], [R] sembol grupları 5 bit ile ifade edilirken [N], [O], [T], [**TO**], [**BE**], [**OR**], [**TOB**], [**EO**], [**RN**], [**OT**] sembol grupları ve durdurma kodu 6 bit ile ifade edilmektedir.

LZW tekniğinin kullanılmaması durumunda 25 sembolden oluşan metni saklamak için 125 bit gerekirken sıkıştırma işleminden sonra 96 bit gerekmektedir.

$$(25 \text{ sembol } \times 5 \frac{\text{bit}}{\text{sembol}}) = 125 \text{ bit} \qquad \text{(E 2.8)}$$

$$(6 \text{ sembol} \times \frac{5\text{bit}}{\text{sembol}}) + (11 \text{ sembol} \times \frac{6\text{Bit}}{\text{sembol}}) = 96 \text{ bit} \qquad \text{(E 2.9)}$$

Bu veriler ışığında, LZW tekniği kullanılarak yaklaşık %23 oranında sıkıştırma kazancı elde edilmiştir.

2.1.6. MSE (Mean Squared Error)

MSE, iki sinyal arasındaki benzerliği ölçmek için kullanılan bir mühendislik yöntemidir. MSE değeri, ne kadar azsa sinyaller o oranda benzerdir. Görüntü sıkıştırma teknolojilerinde, orijinal görüntü ile sıkıştırma sonrası elde edilen görüntünün benzerlik oranının veya hata oranının belirlenmesinde kullanılmaktadır. MSE, orijinal görüntü ile sıkıştırılmış görüntünün pikselleri arasındaki farkların kareleri toplanarak elde edilir ve σ^2 ile gösterilir. MSE değeri Eşitlik 2.10 ile hesaplanmaktadır.[34]

$$\sigma^2 = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [\, I(i,j) - K(i,j) \,]^2 \qquad \text{(E 2.10)}$$

2.1.7. PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)

PSNR, MSE gibi iki sinyal (görüntü, ses, video vb.) arasındaki benzerliği ve sıkıştırma verimliliğini ölçmeye yarayan bir yöntemdir. PSNR, orijinal sinyal üzerindeki maksimum gücün, sinyalin hatasına oranıdır. Sinyallerin büyüklüğü çok geniş aralıklarda değer alabildiği için PSNR değeri, desibel (dB) türünden logaritmik olarak ifade edilmektedir. Sıkıştırma kalitesi PSNR değeri ile doğru orantılı olarak değişmektedir. PSNR değeri Eşitlik 2.11 ile hesaplanmaktadır.[35]

$$\text{PSNR} = 10 \times \log_{10}\left(\frac{{\text{MAX}_I}^2}{\text{MSE}}\right) \qquad \text{(E2.11)}$$

Formülde belirtilen MAX_I değeri görüntüyü oluşturan bir pikselin alabileceği maksimum değeri göstermektedir. Piksel derinliği X bit ile ifade edilirse MAX_I değeri $2^x - 1$ denklemi ile bulunur. Örnek verilecek olursa 8 bit piksel derinliğine sahip bir görüntünün MAX_I değeri $2^8 - 1 = 255$ olarak bulunur.

[34] Pooja Kaushik ve Yuvraj Sharma, "Comparison Of Different Image Enhancement Techniques Based Upon Psnr & Mse", *International Journal of Applied Engineering Research*, Cilt:7, Sayı:11, 2012.
[35] a.g.m.

8 bit renk derinliğini destekleyen görüntü ve video sıkıştırma uygulamalarında kabul edilebilir PSNR değeri, 30 dB - 50 dB; 16 bit renk derinliğini destekleyen uygulamalarda ise 60 dB - 80 dB aralığında değişmektedir. Kablosuz ağ üzerinden veri transferlerinde ise kabul edilebilir PSNR değeri 20 - 25 dB arasında değişmektedir.

2.2. GÖRÜNTÜ SIKIŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ

Sayısal görüntü verileri, yapıları gereği çok fazla gereksiz bilgi içermektedir. Bu gereksiz bilgiler nedeniyle görüntü verilerini saklamak ve ağ üzerinden aktarmak oldukça zordur. Bu sorunun çözümü için görüntü sıkıştırma teknolojileri geliştirilmiştir. Görüntü sıkıştırma işleminde gereksiz bilgiler atılırken orijinal görüntüden çok fazla uzaklaşılmamaya da dikkat edilmektedir.

Görüntü sıkıştırma teknolojileri kayıplı ve kayıpsız olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kayıpsız görüntü sıkıştırma teknolojileri, birbirini takip eden pikseller arasında benzerliğin fazla olduğu tablo, şekil, çizim gibi görüntülerde kullanılırken kayıplı görüntü sıkıştırma teknolojileri, yüksek karmaşıklığa sahip fotoğraf tipi görüntülerde kullanılmaktadır. Görüntü türüne göre uygun sıkıştırma tekniğinin seçilmesi sıkıştırma verimliliği açısından önem arz etmektedir.

2.2.1. Kayıpsız Görüntü Sıkıştırma Teknolojileri

Kayıpsız görüntü sıkıştırma teknolojileri, olasılık (istatistik) veya sözlük tabanlı algoritmaların yanı sıra iki algoritmayı bir arada kullanan yöntemler aracılığıyla da gerçekleştirilebilmektedir. Yaygın olarak kullanılan kayıpsız sıkıştırma teknolojilerinden GIF, LZW algoritmasını kullanırken PNG, DEFLATE algoritmasını kullanmaktadır.

2.2.1.1. Bitmap

Bitmap, Microsoft tarafından sayısal görüntüleri saklamak için geliştirilen bir görüntü formatı olup 32 bit renk derinliğine kadar çalışabilmektedir. 8 bit görüntülerde 256 (2^8), 32 bit görüntülerde ise 3.293.967.296 (2^{32}) farklı renk tonu desteklenmektedir. Bitmap formatında, pikseller sol alt köşeden sağ üst köşeye doğru B, G, R renk bileşenleri şeklinde sıralanmaktadır. Bitmap, sıkıştırma işlemini RLE (Run Length Encoding) tekniğini kullanarak gerçekleştirmektedir.[36]

2.2.1.2. GIF (Graphics Interchange Format)

LZW algoritması temel alınarak geliştirilen GIF, 1987 yılında CompuServe tarafından geliştirilmiş olup 8 bit renk derinliğine kadar çalışabilmektedir. JPEG ile birlikte bilgisayar dünyasının en yaygın kullanılan sıkıştırma formatlarından birisidir. PNG ve JPEG'den farklı olarak GIF, piksel tabanlı animasyonların üretilmesine imkân vermektedir. Fotoğraf gibi karmaşık renk bileşenlerine sahip görüntülerin sıkıştırılmasında yetersiz kalsa da, az sayıda renk bileşeninin kullanıldığı görüntülerde (grafik, tablo vb.) sıklıkla kullanılmaktadır.[37]

2.2.1.3. PNG (Portable Network Graphics)

PNG, GIF formatına rakip olarak 1995 yılında geliştirilmiştir. PNG formatının ilk sürümü (1.0) 1996 yılında yayınlanmış olup ISO/IEC 15948:2003 adıyla standart haline getirilmiştir. PNG formatının yaygınlaşması, Unisys'nin 1999 yılında LZW lisansını serbest bırakmasıyla gerçekleşmiştir. Yüksek oranda sıkıştırma sağladığı için GIF standardını çok hızlı bir şekilde gölgede bırakmış ve

[36] Emir Öztürk, *Görüntü Sıkıştırma Yöntemlerinin Etkinliğini Arttıran Dönüşüm ve Bölümlendirme İşlemleri*, Trakya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Edirne, 2012, s.3.
[37] CompuServe Incorporated, *Graphics Interchange Format Programming Reference*, Ohio, 1990. https://www.w3.org/Graphics/GIF/spec-gif89a.txt (16.07.2015)

dünya genelinde yaygınlaşmıştır. Temelini DEFLATE algoritması oluşturmaktadır.[38] Kayıplı görüntü sıkıştırma teknolojisi JPEG'den daha kaliteli bir sıkıştırma olanağı sunsa da JPEG kullanılarak sıkıştırılan bir görüntüden 4 - 5 kat daha fazla yer kaplamaktadır. PNG formatı basit, taşınabilir ve esnek bir yapıya sahiptir. Söz konusu avantajlardan ötürü dünya genelinde en çok kullanılan kayıpsız görüntü sıkıştırma teknolojileri arasında yer almaktadır.

2.2.2. Kayıplı Görüntü Sıkıştırma Teknolojileri

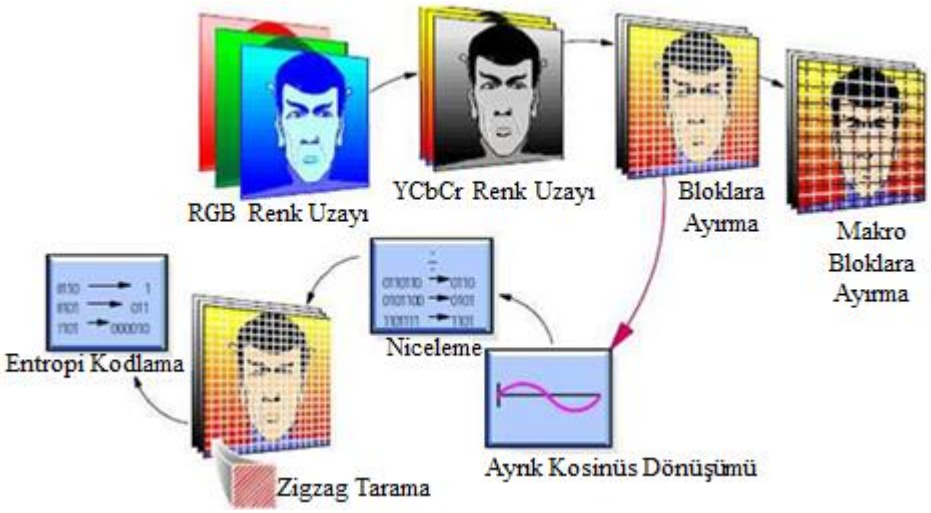
Kayıplı görüntü sıkıştırma teknolojileri, görüntüde insan gözünün az duyarlı olduğu yüksek frekans bileşenlerinin atılması prensibine dayanmaktadır. Sayısal sistemlerin gelişimiyle beraber inanılmaz bir artış gösteren fotoğraf kalitesindeki görüntülerin sıkıştırılması için kullanılmaktadır. Kayıpsız sıkıştırma teknolojilerinden farklı olarak görüntü çok sayıda ara işleme tabi tutulmakta ve bu durum sıkıştırma süresinin artmasına neden olmaktadır. Ancak, yüksek sıkıştırma oranı sayesinde görüntülerin çok düşük veri boyutlarında ifade edilebilmesini sağlamaktadır.

2.2.2.1. JPEG (Joint Photographic Experts Group)

JPEG, Joint Photographic Experts Group tarafından 1992 yılında geliştirilmiş ve 1994 yılında ISO 10918-1 adıyla standart haline getirilmiş bir kayıplı görüntü sıkıştırma teknolojisidir. JPEG2000 ve JPEGXR teknolojilerinin temelini oluşturan DCT (Discrete Cosine Transform) algoritması temel alınarak geliştirilmiş olan JPEG, 24 bit renk derinliğine kadar çalışmaktadır.[39] 24 bit renk derinliğini desteklediğinden dolayı sayısal fotoğraflarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Kayıpsız görüntü sıkıştırma teknolojilerinin aksine birden fazla algoritmanın bir araya getirilmesiyle

[38] Paula Aguilera, *Comparison of different image compression formats*, Wisconsin College of Engineering: ECE 553 Project Report, 2006, s.2.
[39] a.g.k, s.3.

oluşturulmuş ve bu durum sıkıştırma süresinin artışına neden olmuştur. Günümüzde yaygın olarak kullanılan JPEG teknolojisinin sıkıştırma adımları Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 JPEG teknolojisi sıkıştırma adımları [40]

Birinci adımda; RGB formatındaki renk bilgisi YUV formatından YCbCr formatına çevrilir. RGB uzayında her bir renk 8 bit ile ifade edilmektedir. Dolayısıyla her bir piksel 24 (8×3) bit ile ifade edilmektedir. Ana renklerden olan Kırmızı, Yeşil ve Mavi renklerin bir araya gelmesiyle 2^{24} sayıda renk tonu elde edilmektedir.

İnsan gözü, görüntüdeki parlaklık bileşenine renklilik bileşeninden daha fazla duyarlıdır. RGB uzayında renk bileşenleri ile parlaklık bileşeni aynı çözünürlüğe sahipken YCbCr uzayında ise insan gözünün duyarlığı olduğu parlaklık bileşeni daha fazla çözünürlüğe sahiptir. YUV, daha çok analog sistemlerde kullanılan bir formatken YCbCr ise YUV formatının sayısal sistemlere uyarlanmış halidir.

YCbCr uzayında parlaklık bileşeni Y, renklilik bileşenlerinin (R, G, B) ortalamalarıyla Eşitlik 2.12 ve 2.13'deki gibi hesaplanmaktadır.

[40] Cem Taşkın, *MPEG-2 Kodlanmış Video Görüntülerinin İçerik Tabanlı Sorgulanması*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Doktora Tezi, Edirne, 2010, s.29.

$$Y = k_r R + k_g G + k_b B$$
$$k_r + k_g + k_b = 1 \qquad \text{(E 2.12)}$$

Denklemde kullanılan k, renk bileşenlerini ağırlıklandırma parametresi olup her bir bileşen için ITU tarafından ITU-R BT.601 standardına göre; $k_b = 0.114$, $k_r = 0.299$, $k_g = 0.587$ olarak belirlenmiştir.[41]

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$
$$C_b = -0.147R - 0.289G + 0.436B \qquad \text{(E 2.13)}$$
$$C_r = 0.615R - 0.515G - 0.100B$$

İkinci adımda, örnekleme azaltılır. İnsan gözü, parlaklık bileşenine renklilik bileşeninden daha fazla duyarlı olduğu için görüntüdeki renk bileşenlerinin çözünürlüğü azaltılırsa örnekleme azaltılmış olur. YCbCr uzayında 4:4:4, 4:2:2, 4:2:0 ve 4:0:0 olmak üzere 4 farklı örnekleme formatı yer almaktadır.

4:4:4 örnekleme formatında renk bileşenleri ve parlaklık bileşeninin çözünürlüğü aynı olup görüntüde herhangi bir kayıp söz konusu değildir. Renk bileşenlerinin önemli olduğu profesyonel uygulamalarda 4:4:4 formatı kullanılmaktadır.

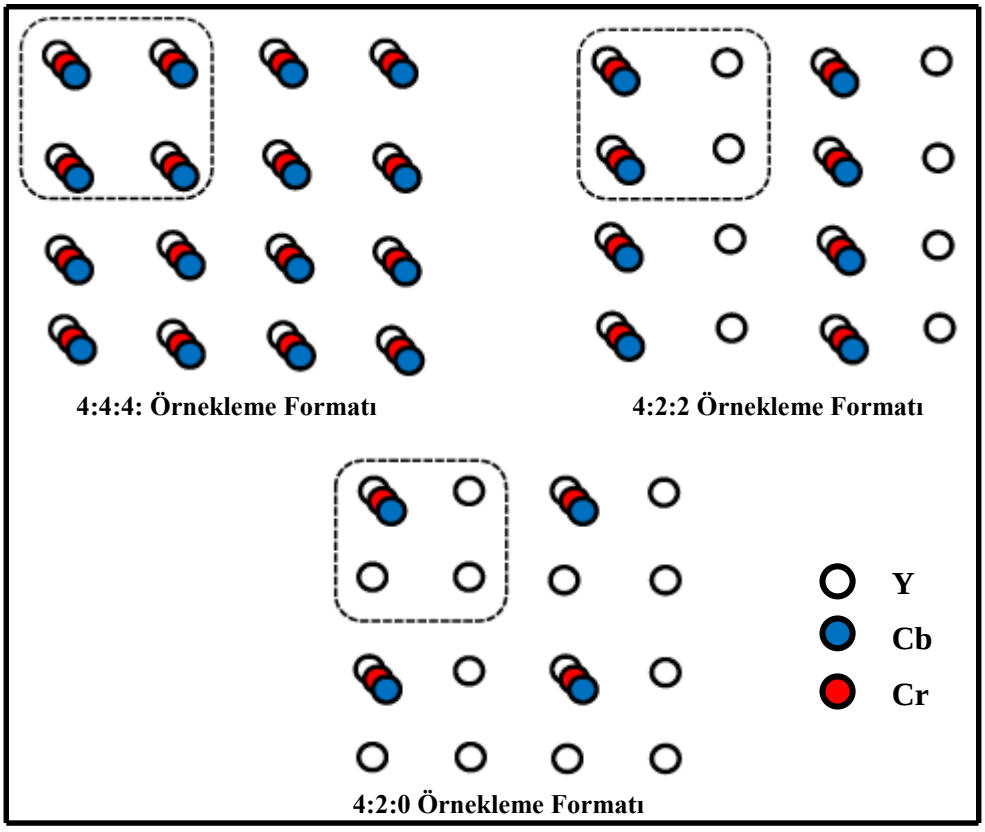
4:2:2 örnekleme formatında renk bileşenleri parlaklık bileşeni ile aynı dikey çözünürlüğe sahiptir ancak renk bileşenlerinin yatay çözünürlükleri parlaklık bileşeninin yatay çözünürlüğünün yarısı kadardır.

4:2:0 örnekleme formatında renk bileşenlerinin yatay ve dikey çözünürlükleri, parlaklık bileşeninin çözünürlüğünün yarısı kadardır. JPEG, örneklemeyi azaltmak için genellikle 4:2:0 formatını kullanmaktadır. Ayrıca, yüksek sıkıştırma sağlayan

[41] Recommendation ITU-R BT.601, *Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios*, International Telecommunication Union, 1995.

4:2:0 formatı DVD, telekonferans, yayıncılık, ağ üzerinden paylaşılan videolarda yoğun olarak tercih edilmektedir.

4:0:0 örnekleme formatında sadece parlaklık bileşenine ait çözünürlük söz konusu olup renk bileşenleri yoktur. Şekil 2.2'de farklı örnekleme formatları gösterilmektedir.



Şekil 2.2 YCbCr uzayı örnekleme formatları [42]

Üçüncü adımda; görüntü, 8×8 büyüklüğünde 64 pikselden oluşan bloklara ayrılır ve her bir blok için ayrı ayrı DCT uygulanır. Her bir bloğun ayrı ayrı ele alınması sıkıştırma sürecinin hızlı gerçekleşmesine sağlamaktadır. Görüntü bloklara ayrılıp dönüştürüldükten sonra tekrar bloklar bir araya getirilirken görüntüde ufak bozulmalar meydana gelmektedir. Bu etkiye, bloklama etkisi adı verilmektedir.

[42] Iain E.G. Richardson, *H.264 and MPEG-4 Video Compression: Video Coding for Next-Generation Multimedia*, John Wiley & Sons Ltd., 2003, s.18.

Dördüncü adımda; görüntünün uzamsal bölgeden frekans bölgesine aktarılması ve görüntü üzerinde daha kolay işlem yapılabilmesi amacıyla DCT dönüşümü uygulanmaktadır. DCT dönüşümü ile yüksek frekans bileşenleri ortaya çıkmaktadır. Bloklar 8×8 büyüklüğünde olduğu için DCT dönüşümü sonrası her bir blok için 64 tane katsayı ortaya çıkmaktadır. Görüntünün ilk pikselini oluşturan F(0,0) katsayısı DC katsayı, bu piksel dışında kalan 63 piksel AC katsayı olarak adlandırılır.[43] DCT dönüşümü Eşitlik 2.14'te gösterilmektedir.

$$F(u,v) = \frac{1}{4} C_v C_u \sum_{i=0}^{7} \sum_{j=0}^{7} f(i,j) \cos\frac{(2i+1)u\pi}{16} \cos\frac{(2j+1)v\pi}{16} \qquad \text{(E 2.14)}$$

Denklemde kullanılan C_v, C_u parametreleri, DC katsayı hesaplanırken $1/\sqrt{2}$ değerini alırken AC katsayılar hesaplanırken 1 değerini almaktadır. DCT uygulanan bir görüntüye ait katsayı değişimi Şekil 2.3'te gösterilmektedir.

139	144	149	153	155	155	155	155
144	151	153	156	159	156	156	156
150	155	160	163	158	156	156	156
159	161	162	160	160	159	159	159
159	160	161	162	162	155	155	155
161	161	161	161	160	157	157	157
162	162	161	163	162	157	157	157
162	162	161	161	163	158	158	158

DCT Öncesi Katsayılar

235	-1.0	-12	-3.2	1.1	-1.7	-1.7	1.3
-22	-17	-4.2	-2.2	-1.9	-0.1	0.4	-1.2
-11	-9.3	-1.6	1.5	0.2	-0.9	-0.6	-0.1
-7.1	-1.9	0.2	1.5	0.9	-1	0.0	0.3
-0.6	-0.8	1.5	1.6	-0.1	-0.7	0.6	1.3
1.8	-0.2	1.6	-0.3	-0.8	1.5	1.0	-1.0
-1.3	-0.4	-0.3	-1.5	-0.5	1.7	1.1	-0.8
-1.6	1.6	-2.8	-1.8	1.9	1.2	-0.6	-0.4

DCT Sonrası Katsayılar

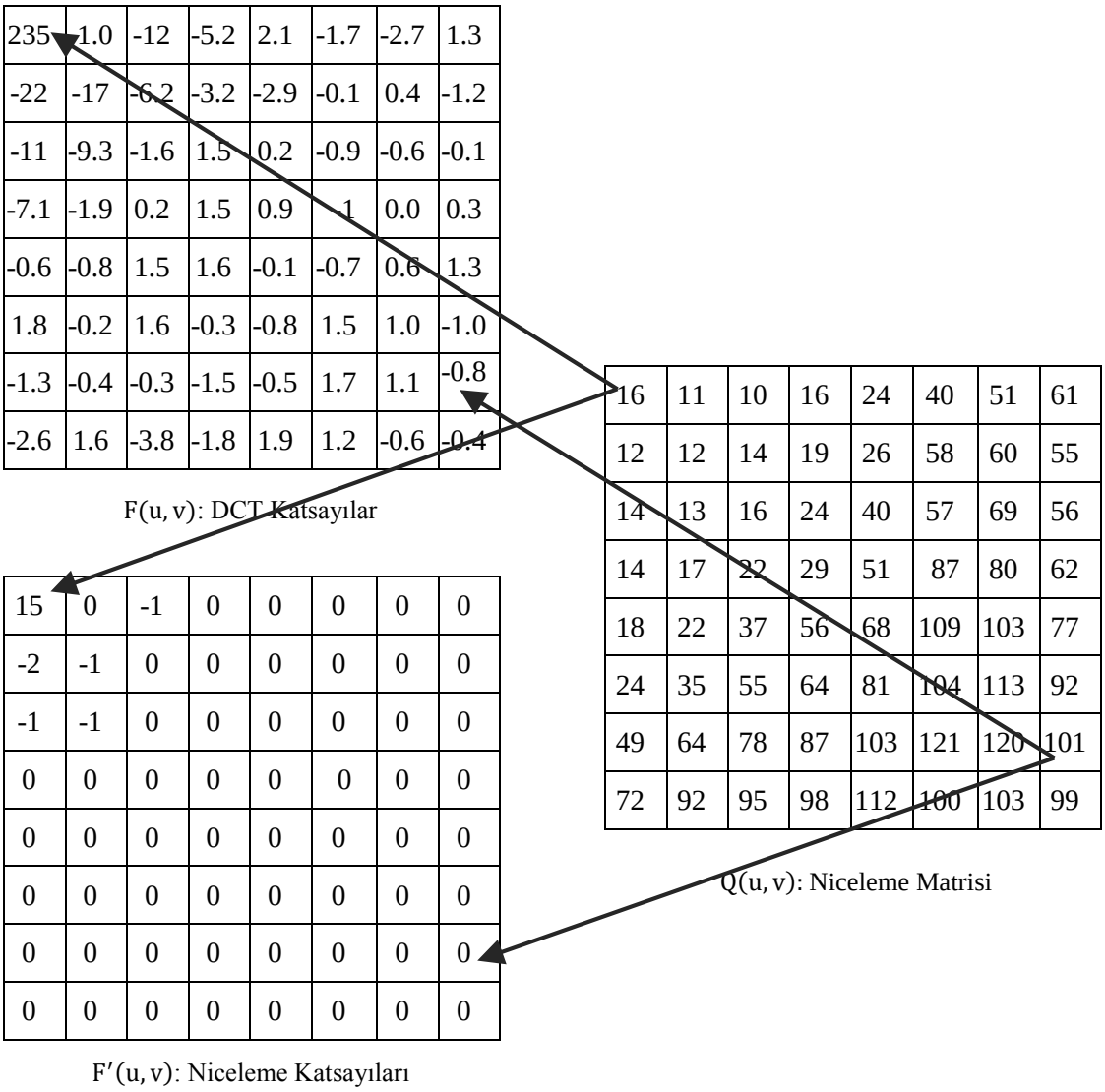
Şekil 2.3 DCT dönüşümü

Beşinci adımda, niceleme işlemi gerçekleştirilir. DCT sonucunda her piksel için elde edilen katsayılar $F(u,v)$ genellikle ondalıklıdır. Sıkıştırma işlemine başlamadan önce seçilen kalite oranına göre JPEG, Q(u,v) adında bir niceleme matrisi oluşturur ve DCT dönüşümü sonucu elde edilen katsayılar bu niceleme matrisine bölünür. Bölünme işlemi sonrası yüksek frekans bileşenlerinin değeri sıfıra yakın çıkar ve bu değerler sıfıra yuvarlanır. Niceleme işlemi sonrası elde edilen

[43] Yossi Cohen, *Introduction to Video Compression*, 2010, s.31-34. http://www.slideshare.net/DSPIP/introduction-to-video-compression-3244304 (23.07.2015)

katsayılar $F'(u,v)$ ile gösterilir. Niceleme işleminin formülü Eşitlik 2.15'te gösterilmektedir.[44] Formülün DCT katsayılara uygulanması neticesinde ortaya çıkan sonuç ve niceleme matrisi Şekil 2.4'te gösterilmektedir.

$$F'(u,v) = \left[\frac{F(u,v)}{Q(u,v)}\right] \qquad \text{(E 2.15)}$$

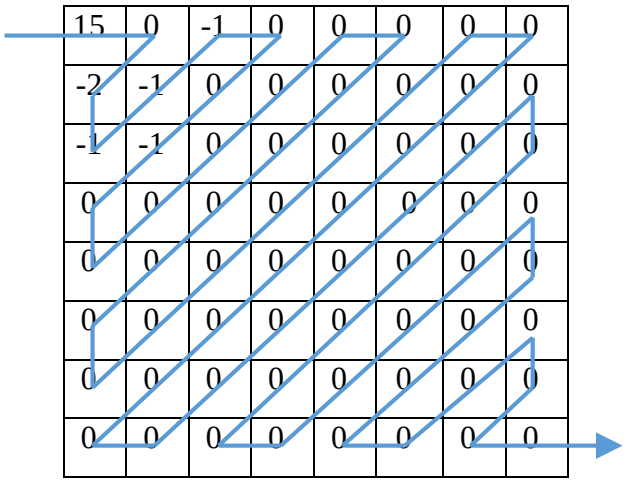


Şekil 2.4 JPEG teknolojisi niceleme işlemi

Son adımda, niceleme işlemi sonrası elde edilen katsayılar için köşegen tarama işlemi gerçekleştirilir. Köşegen tarama ile katsayısı 0 olan yüksek frekans bileşenlerinin art arda gelmesi ve son adımda uygulanacak olan kayıpsız sıkıştırma

[44] A. Bruna, 2008, s.18.

işleminin (Huffman, RLE vb.) hızlı gerçekleşmesi sağlanır. Köşegen tarama işlemi, her bloğun DC katsayısından başlayarak devam eder ve o bloğa ait en son AC katsayı da tarandıktan sonra komşu bloğun DC katsayısına geçilir. İşlem bütün bloklar için ayrı ayrı uygulanır. Köşegen tarama işlemi Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5 JPEG teknolojisi köşegen tarama işlemi

2.2.2.2. JPEG2000 (Joint Photographic Experts Group - 2000)

JPEG2000, Joint Photographic Experts Group tarafından 2000 yılında geliştirilmiş ve ISO/IEC 15444-1 adıyla standart haline getirilmiş bir görüntü sıkıştırma teknolojisidir. JPEG teknolojisindeki en büyük sorun, bloklama etkisinin sıkıştırma sonrası pikseller arası keskin geçişlere neden olmasıdır. JPEG2000, bloklama etkisini ortadan kaldırmasına rağmen sıkıştırma oranı arttıkça görüntüdeki bulanıklaşma etkisini artırmaktadır.[45] JPEG2000'in JPEG'e göre üstün olduğu noktalar aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.[46]

- Aynı sıkıştırma oranında daha kaliteli görüntü sunmaktadır.
- Görüntüde sadece istenilen alanın kodlanabilmesini sağlamaktadır. ROI (Region of Interest) özelliği aracılığıyla görüntüde önemli alanların daha

[45] Farzad Ebrahimi, Matthieu Chamik ve Stefan Winkler, *JPEG vs. JPEG2000: An Objective Comparison of Image Encoding Quality*, The SPIE 49th Annual Meeting: International Society for Optics and Photonics, 2004, s.1-2.
[46] Karen L. Gray ve Andrea Bör, *The JPEG2000 Standard*, Technische Universitat, Almanya, 2013, s.5-22.

yüksek kalitede, önemsiz alanların ise daha düşük kalitede sıkıştırılabilmesine olanak sağlamaktadır.

- Dinamik bir yapıya sahip olup hem kayıplı hem de kayıpsız sıkıştırma mimarilerini içermektedir.
- JPEG2000 ile sıkıştırılmış görüntü, tüm kalite seviyelerinde açılabilmekte ve görüntü üzerinde sadece belirli bir bölgeye erişim sağlanabilmektedir.

Şekil 2.6'da JPEG ve JPEG2000 teknolojileri ile sıkıştırılan görüntüler gösterilmektedir. İlgili şekilden görüleceği üzere JPEG'de bloklama etkisi fazlasıyla belirgindir. JPEG2000'de ise bloklama etkisi daha azdır ve çok daha kaliteli bir görüntü sunmaktadır.



JPEG JPEG2000

Şekil 2.6 JPEG bloklama etkisi [47]

JPEG2000 teknolojisinin sıkıştırma adımları JPEG ile benzerlik göstermektedir. İlgili adımlar; YCbCr dönüşümü, bölümlendirme, uzamsal bölgeden frekans bölgesine geçmek için kullanılan DWT (Discrete Wavelet Transform) dönüşümü, ROI seçimi ve entropi kodlama olarak sıralanabilir.[48]

Birinci adımda, JPEG'de olduğu gibi RGB renk bilgileri YUV formatına çevrilir. JPEG2000, bu geçişi iki farklı şekilde gerçekleştirmektedir. Bunlardan ilki, JPEG teknolojisinin de kullanmış olduğu YCbCr yöntemidir. Ancak YCbCr yöntemi ile elde edilmiş renk ve parlaklık bilgileri ters dönüşüm uygulandığında kayıpsız bir

[47] http://www.gastrohep.com/ebooks/thumbnails.asp?book=1405120762&id=5 (28.07.2015)
[48] Evgin Göçeri ve A. Kadir Yaldır, "Jpeg2000 Standardının Yeni Özelliklerini Destekleyen Bir Görüntü İşleme Uygulaması Geliştirilmesi", *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt:13, Sayı:3, 2007, s.337-338.

şekilde geri elde edilemez. Kayıpsız bir ters dönüşüm yapılamadığı için bu yöntem, ICT (Irreversible Component Transform) olarak da adlandırılır. İkincisi ise RCT (Reversible Component Transform) olarak adlandırılır ve ters dönüşüm sırasında herhangi bir kayıp yaşanmaz. JPEG2000 teknolojisi ile kayıpsız olarak sıkıştırma yapılmak isteniyorsa RCT, kayıplı olarak sıkıştırma yapılmak isteniyorsa ICT tekniğinin kullanılması gerekmektedir. Yeni yönteme ilişkin dönüşüm ve ters dönüşüm formülleri Eşitlik 2.16 ve 2.17'de gösterilmektedir.

$$\begin{cases} Y = (R + 2G + B)/4 \\ C_b = B - G \\ C_r = R - G \end{cases} \quad \text{(E 2.16)}$$

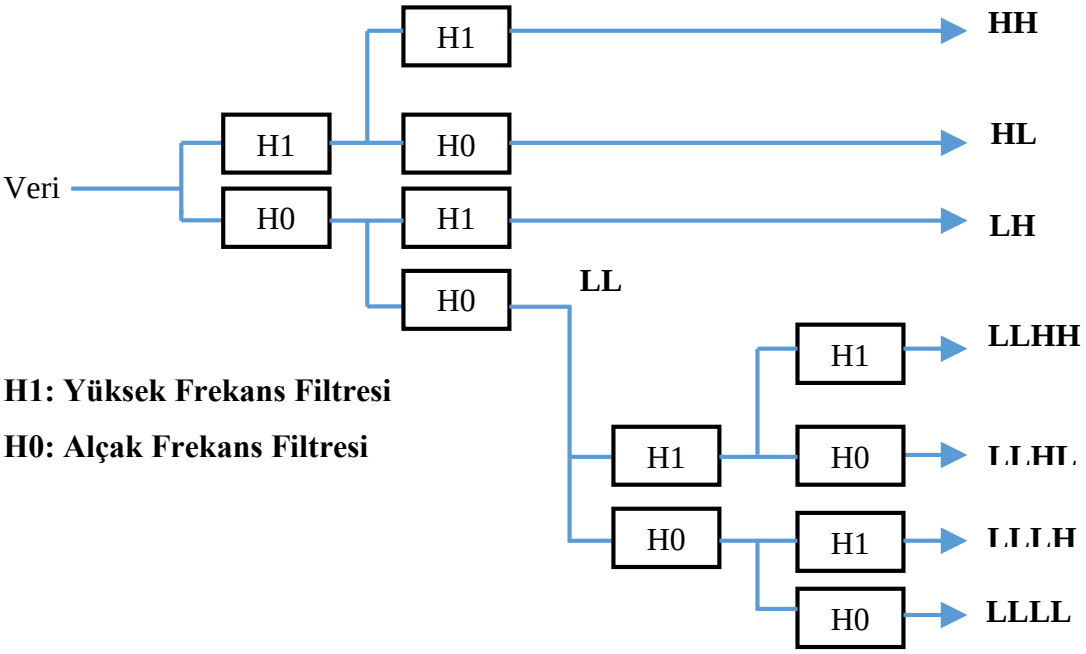
$$\begin{cases} G = Y - (C_b + C_r)/4 \\ R = C_r + G \\ B = C_b + G \end{cases} \quad \text{(E 2.17)}$$

İkinci adımda, bölümlendirme işlemi gerçekleştirilir. Bölümlendirme işlemi, JPEG'de olduğu gibi 8×8 büyüklüğünde bloklarla sınırlı değildir. Görüntü, ikinin katlarında olacak şekilde farklı bloklar ile bölümlendirilebilir. Bölümlendirilmiş bloklar "tile" olarak adlandırılır. Seçilen blok büyüklüğü görüntünün satır ve sütun sayısına tam olarak bölünemiyorsa en alttaki ve en sağdaki kısımlar hariç olmak üzere görüntü eşit olarak bölümlendirilir. JPEG2000 ile gelen ROI özelliği sayesinde görüntünün tamamı değil de isteğe bağlı kısmının sıkıştırılabilmesi bölümlendirme işleminin önemini artırmaktadır.[49]

Üçüncü adımda, dönüşüm işlemi gerçekleştirilir. JPEG2000, bloklara ayrılmış görüntünün uzamsal bilgisini frekans bilgisine dönüştürmek için DWT tekniğini kullanır. DWT tekniğinde, görüntü yüksek frekans ve alçak frekans filtrelerinden geçirilerek L ve H olmak üzere iki ayrı alt bant elde edilir. L ve H alt bantları tekrar yüksek ve alçak frekans filtrelerinden geçirilerek LL, LH, HL ve HH olmak üzere 4 ayrı alt bant elde edilir. Bu işlem, istenilen sıkıştırma oranına bağlı

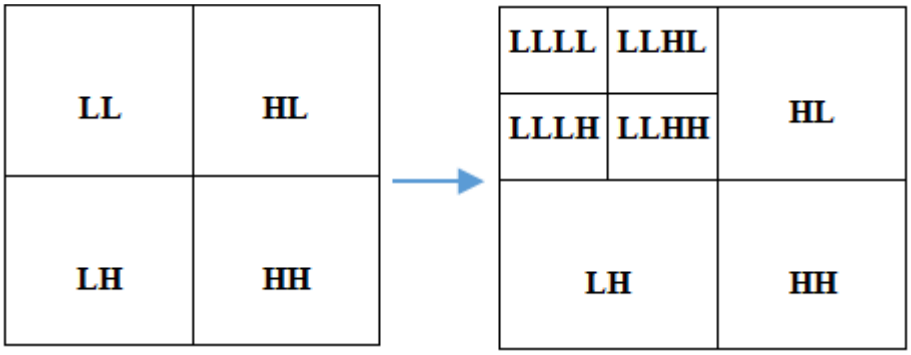
[49] K. L. Gray ve A. Bör, 2013, s.8-9.

olarak LL alt bandına ayrıca uygulanabilir.[50] Alt bantların elde edilmesi işlemi Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 DWT dönüşümünde veriyi alt bantlara ayırma işlemi

DWT dönüşümü önce satırlar daha sonra sütunlar olmak üzere her bir blok (tile) için ayrı ayrı uygulanır. Uygulanan yüksek ve alçak frekans filtreleri Şekil 2.8'de gösterilmektedir.[51]



Şekil 2.8 DWT dönüşümünde görüntüyü alt bantlara ayırma işlemi

Dördüncü adımda, DWT dönüşümü sonrası kaliteli görünmesi istenen alanlar ROI tekniği aracılığı ile seçilir. Daha kaliteli görüntülenmek istenen alanlar daha az sıkıştırılarak sıkıştırma sonrası kaliteli görüntü elde edilebilir. Örnek verilecek

[50] a.g.k., s.7.
[51] E. Göçeri ve A.K. Yaldır, 2007, s.340.

olursa, bir vesikalık fotoğraf için kritik olan yer insan yüzünün olduğu bölümdür. Fotoğrafın arka fonu çok önemli değildir. Dolayısıyla insan yüzünün bulunduğu bölge için daha düşük boyutlarda sıkıştırma yapılırken, arka fonun bulunduğu bölgeler için daha yüksek boyutlarda sıkıştırma yapılmalıdır. ROI özelliği, özellikle medikal amaçlı görüntülemelerde yoğun olarak kullanılmaktadır.

Beşinci adımda, niceleme işlemi gerçekleştirilir. JPEG2000 teknolojisinde kullanılan niceleme adımı, JPEG ile benzerlik taşır. Aralarındaki temel fark, ROI seçimi ile yüksek kalitede görüntülenmek istenen bloklar için görüntünün geneli için uygulanan niceleme matrisi yerine özel olarak tanımlanmış matrisler kullanılır.

Son adımda, JPEG teknolojisinde olduğu gibi köşegen tarama işlemi gerçekleştirilerek katsayısı sıfır olan pikseller bir araya getirilir ve entropi kodlama uygulanır. Bu sayede, son adım olan kayıpsız sıkıştırma (RLE, Huffman vb.) hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir.

2.2.2.3. JPEGXR (Joint Photographic Experts Group - Extended Range)

JPEGXR, Joint Photographic Experts Group ve Microsoft tarafından 2007 yılında geliştirilmiş ve 2009 yılında ISO/IEC 29199 adıyla standarda kavuşmuş bir görüntü sıkıştırma teknolojisidir. Geliştirilme amacı, JPEG2000'in ulaşabildiği sıkıştırma oranlarını elde edebilmenin yanı sıra JPEG kadar hızlı sıkıştırma yapabilmektir.

JPEGXR, HD (High Definition) ve HDR (High Dynamic Range) görüntülerin sıkıştırılması için sıklıkla kullanılmaktadır. Son yıllarda gelişmekte olan HDR görüntüler, farklı odak değerlerinde çekilen fotoğrafların birleştirilmesiyle elde edilir

ve bu sayede görüntüye ait farklı parlaklık bilgilerindeki kayıp azaltılır.[52] Farklı odak değerlerinde çekilen fotoğraflar Şekil 2.9'da gösterilmektedir.[53]



Odak Değeri : -2 Odak Değeri: 0 Odak Değeri: +2

Şekil 2.9 Farklı odak değerlerinde çekilen fotoğraflar

Odak değerinin -2 olduğu durumda parlaklık değerinin yüksek olduğu, odak değerinin +2 olduğu durumda ise parlaklık değerinin düşük olduğu kısımlarda kayıp oluşur. Ancak parlaklık değerlerinin tam ters olduğu kısımlar daha kaliteli görüntülenir. Odak değerinin 0 olduğu durumda daha dengeli bir görüntü elde edilse de yüksek ve düşük parlaklık bölgelerinde az da olsa kayıp yaşanır. HDR teknolojisi, farklı odak değerleri sayesinde elde edilen kaliteli kısımların birleştirilmesiyle oluşturulur. Farklı odak değerlerinde çekilen fotoğrafların birleştirilmesiyle oluşan HDR görüntü, Şekil 2.10'da gösterilmektedir. İlgili şekilde görüldüğü gibi görüntüye ait farklı parlaklık bölgeleri HDR teknolojisi ile çok daha canlı bir şekilde görüntülenmektedir.



Şekil 2.10 HDR görüntü teknolojisi [54]

[52] Frédéric Dufaux, Gary J. Sullivan ve Touradj Ebrahimi, "The JPEG XR Image Coding Standard", *IEEE Signal Processing Magazine*, Cilt:26, Sayı:6, 2009, s.196.
[53] http://www.fotografteknikleri.com/photoshop-ile-hdr-fotograf-olusturmak/ (26.03.2015)
[54] a.g.k. (26.03.2015)

JPEGXR teknolojisinin sıkıştırma adımları JPEG ile benzerlik göstermektedir. İlgili adımlar; YCbCr dönüşümü, bölümlendirme, uzamsal bölgeden frekans bölgesine geçmek için FCT (Forward Core Transform) ve OT (Overlap Transform) dönüşümü, katsayı tahmini ve entropi kodlama olarak sıralanabilir.[55]

Birinci adımda, RGB renk bilgileri YUV formatına çevrilir. JPEGXR'ye ait renk uzayı dönüşüm formülleri Eşitlik 2.18'de gösterilmektedir.

$$\begin{cases} Y = G - C_b/2 \\ C_b = -(R - G + C_r/2) \\ C_r = B - R \end{cases} \quad \text{(E 2.18)}$$

İkinci adımda, bölümlendirme işlemi gerçekleştirilir. JPEGXR teknolojisinde görüntü 4×4 büyüklüğünde 16 piksellik bloklara ayrılır. Eğer görüntünün satır ve sütun sayıları 16'nın katı şeklinde değilse görüntü sağa ve aşağı olmak üzere genişletilir. Bölümlendirme işlemi uzamsal mod ve frekans modu olmak üzere iki farklı yöntemle gerçekleştirilir. Uzamsal mod, JPEG ve JPEG2000'deki bölümlendirme mantığına benzerdir. Frekans modunda ise; en düşük frekans katsayısı DC, düşük frekans katsayıları LP ve yüksek frekans katsayıları HP ayrı ayrı bölümlendirilir.

Üçüncü adımda, dönüşüm işlemi gerçekleştirilir. JPEGXR'de dönüşüm iki aşamalı olarak gerçekleştirilir. İlk aşamada FCT, ikinci aşamada OT uygulanır. Dönüşümün amacı; diğer teknolojilerde (DCT ve DWT) olduğu gibi görüntüye ait uzamsal bilgilerin frekans bilgisine çevrilmesini sağlamaktır.

Bölümlendirme işlemi sonrası elde edilen 4×4 büyüklüğünde 16 blok bir araya getirilir ve 16×16 büyüklüğünde bir makro-blok üretilir. Bu aşamadan sonra her 4×4 büyüklüğünde blok için ayrı ayrı FCT uygulanır. İlk FCT sonrası her bir blok için 1 DC (en düşük frekans bileşeni) ve 15 HP bileşen elde edilir. Her bir

[55] Sezer Bağlan, *JPEGXR Başarımı*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2014, s.11-12.

bloktan elde edilen DC katsayılar ile 4×4 büyüklüğünde farklı bir blok üretilir ve elde edilen bu bloğa yeniden FCT uygulanır. İkinci FCT sonrasında da 1 DC ve 15 LP bileşen elde edilir ve makro-bloğu oluşturan her bir bloğun ilk pikseline dağıtılır. Bloklara uygulanan ilk FCT sonucunda elde edilen 240 HP, ikinci FCT sonucunda elde edilen 15 LP ve DC bileşen bloklara ayrı ayrı dağıtılır. FCT işlemi Şekil 2.11'de gösterilmektedir.[56]

DC	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP
LP	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP
LP	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP
LP	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP	**LP**	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP
HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP	HP

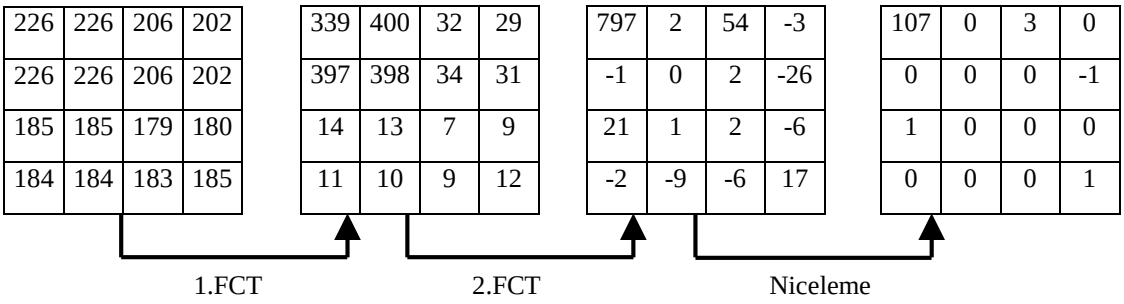
Şekil 2.11 FCT tekniği ve DC, HP, LP katsayıların dağılımı

OT, FCT öncesi uygulanan bir ön filtredir ve uygulanması zorunlu değildir. OT, FCT'de olduğu gibi sadece 4×4 büyüklüğünde bloklara değil aynı zamanda bu blokların sınırlarına da uygulandığı için FCT dönüşümü sonrası oluşacak olan bloklama etkisini ortadan kaldırmaktadır.

Dördüncü adımda, niceleme işlemi gerçekleştirilir. FCT dönüşümü sonrası her piksel için elde edilen katsayıları niceleme matrisine bölünerek katsayı değerleri sıfıra yaklaştırılır. Kayıpsız sıkıştırma yapılmak istenirse niceleme matrisinin değeri

[56] Agnieszka Dabrowska Boruch ve Kazimierz Wiatr, "Implementation of FCT Transformation in JPEG-XR Standard in Programmable Devices", *Automatyka Dergisi*, Cilt:3, Sayı:15, 2011, s.2-3.

bir olarak seçilir. Kayıplı sıkıştırma için ise istenilen kalite oranına göre niceleme matrisi belirlenir ve bu değer birden büyük olur. FCT dönüşümü sonrası elde edilen frekans katsayıları tam sayı olduğu için ilgili tamsayıların niceleme matrisine bölünme işlemleri çok hızlı gerçekleşir. Niceleme işlemi Şekil 2.12'de gösterilmektedir.



Şekil 2.12 JPEGXR teknolojisi niceleme işlemi

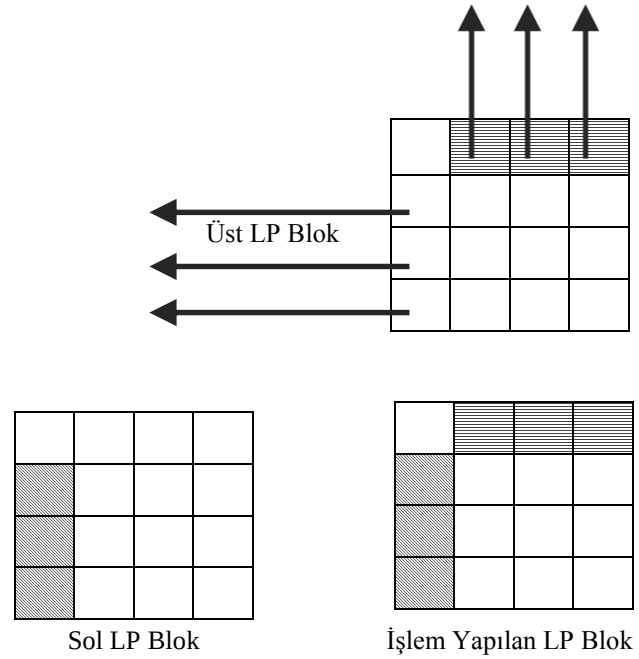
Beşinci adımda, katsayı tahmini yapılır. Görüntüyü oluşturan pikseller büyük benzerlikler gösterir. Bu yüzden benzer piksel değerlerini tekrar tekrar kaydetmek yerine pikseller arasındaki katsayı farkları kaydedilir. JPEGXR, katsayı tahmini için adaptif tahmin yöntemi kullanılır. Adaptif tahmin, iki komşu bloğun birbirlerine ciddi oranda benzerliğe sahip olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Üzerinde işlem yapılan bloğun komşu bloklara benzerlik oranı ayrı ayrı elde edilir ve ilgili sonuca göre tahmin yönü belirlenir.

Adaptif tahmin; FCT'nin ilk aşamasından sonra elde edilen HP katsayılar, FCT'nin ikinci aşamasına girecek olan DC katsayılar ve FCT'nin ikinci aşamasından sonra elde edilen LP katsayılara uygulanmak üzere üçe ayrılmaktadır.

DC katsayı, her 16×16 büyüklüğündeki makro bloğun sol üst köşesinde yer alır ve dolayısıyla DC tahmin, makro bloklar arasında uygulanır. DC tahmin; sol, üst, sol-üst olmak üzere 3 farklı yönde yapılabilir. Hangi yönden tahmin yapılacağı, H-Weight ve V-Weight adı verilen benzerlik oranlarının bulunmasıyla elde edilir. Sol üst makro bloktaki DC katsayıdan; üst makro bloktaki DC katsayının çıkartılmasıyla H-Weight, sol makro bloktaki DC katsayının çıkartılmasıyla V-Weight bulunur. H-Weight, V-Weight'in 4 katından daha büyükse tahmin yönü

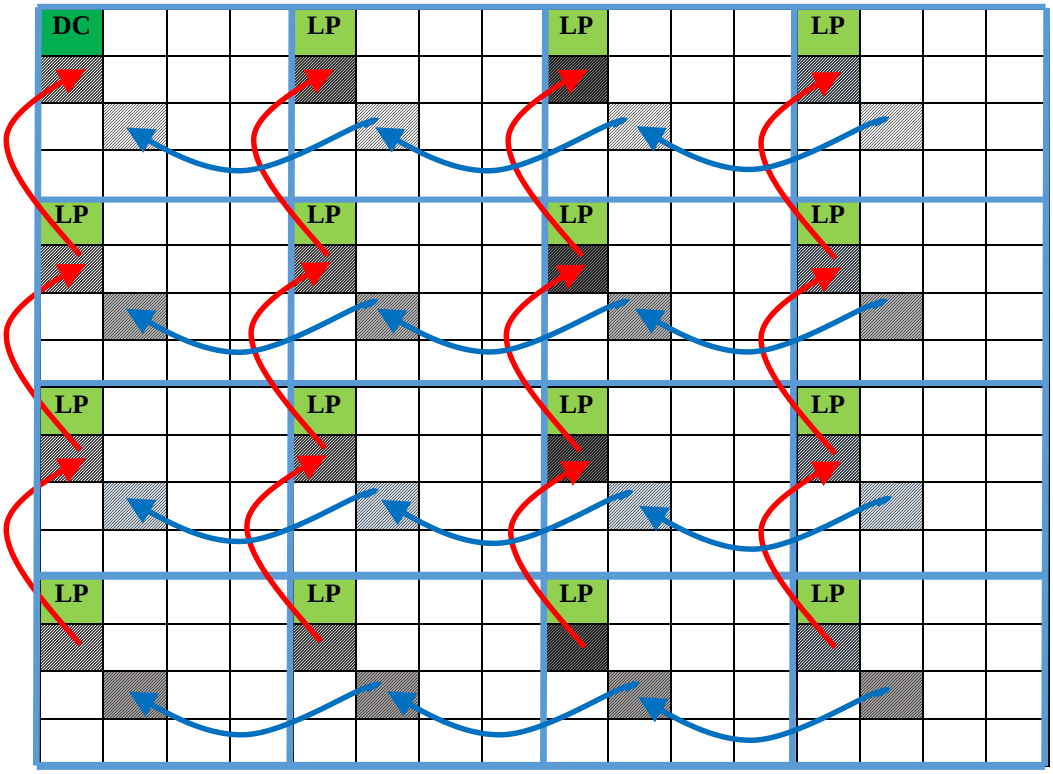
sol; V-Weight, H-Weight'in 4 katından büyükse tahmin yönü üst olarak belirlenir. Bu iki durumun sağlanamadığı durumda ise tahmin yönü sol-üst olarak belirlenir.[57]

HP ve LP katsayıların tahminleri sol ve üst olmak üzere iki farklı yönde yapılabilir. Tahmin yönünün belirlenmesi, DC tahminde olduğu gibidir fakat ağırlıklandırma koşullarının sağlanamadığı durumda DC tahminin aksine tahmin yapılmaz. LP tahmin, 16×16 büyüklüğünde makro-bloğu oluşturan 4×4 büyüklüğünde bloklar arasında HP tahmin ise makro-bloğun kendi içerisinde gerçekleştirilir.[58] Şekil 2.13'te LP tahminin, Şekil 2.14'te HP tahminin nasıl gerçekleştiği gösterilmektedir.



Şekil 2.13 LP tahmin yöntemi [59]

[57] E. Öztürk, 2012, s.20.
[58] S. Bağlan, 2014, s.26.
[59] a.g.e., s.25.



Şekil 2.14 HP tahmin yöntemi

Son adımda, niceleme sonrası edilen katsayıların uyarlı tarama yöntemiyle entropi kodlaması yapılır ve katsayılar kayıpsız sıkıştırma işlemine (RLE, Huffman vb.) uygun hale getirilir. JPEG'de kullanılan köşegen tarama yöntemi JPEGXR'de yerini uyarlı tarama yöntemine bırakmıştır. Bu yöntem, daha karmaşık algoritmalara sahip olsa da köşegen tarama yöntemine göre çok daha verimli sonuçlar üretmektedir.

2.2.2.4. JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR Teknolojilerinin Karşılaştırılması

JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR teknolojilerinin temelini oluşturmaktadır. JPEG, görüntü teknolojisinin gelişimi karşısında yetersiz kalması neticesinde JPEG2000 geliştirilmiştir. JPEG2000, JPEG teknolojisine göre daha yüksek sıkıştırma oranına sahip olmasına rağmen karmaşık tasarımı nedeniyle sıkıştırma süresinin uzamasına ve bulanıklaşma etkisine neden olmaktadır. Her iki teknolojiden elde edilen tecrübeler neticesinde JPEGXR geliştirilmiştir. JPEGXR, JPEG2000

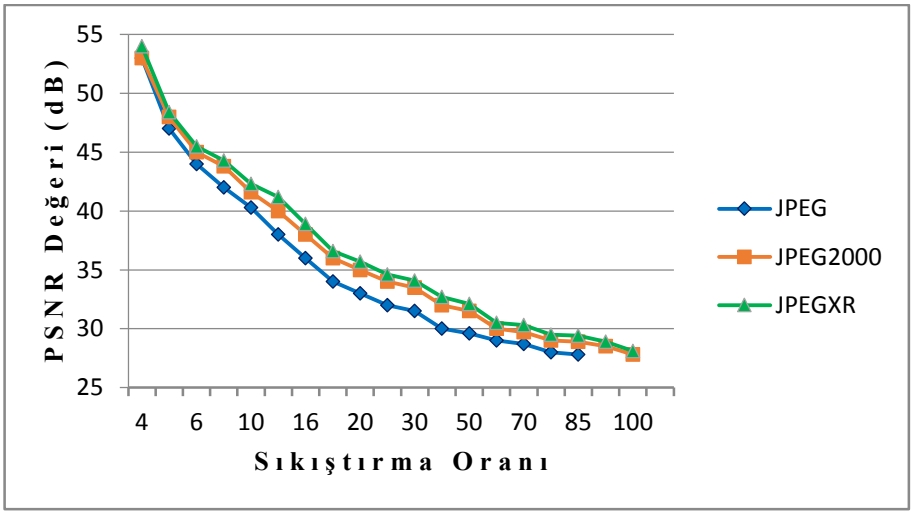
kadar yüksek sıkıştırma oranı sunmasının yanı sıra sıkıştırma süresi anlamında da JPEG kadar hızlıdır.[60]

JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR teknolojilerini kalite, bloklama etkisi ve bulanıklaşma etkisi parametreleri üzerinden karşılaştırmak amacıyla orijinal hali 569 kilobyte olan görüntü çeşitli oranlarla sıkıştırılmıştır. Karşılaştırma için kullanılan değerler MATLAB[61] yardımıyla hesaplanmıştır. Şekil 2.15'te sıkıştırma oranının 1:63 olarak seçilmesi durumunda elde edilen görüntüler yer almaktadır. Şekil 2.16'da ise farklı sıkıştırma oranlarında elde edilen PSNR değerleri gösterilmektedir.



Şekil 2.15 JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR ile sıkıştırılmış görüntüler

[60] F. Dufaux, G.J. Sullivan ve T. Ebrahimi, 2009, s.198.
[61] MATLAB (Matrix Laboratory): Çeşitli matematiksel ve teknik analizlerin yapıldığı dördüncü nesil bir yazılım geliştirme aracıdır.



Şekil 2.16 JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR PSNR değerleri

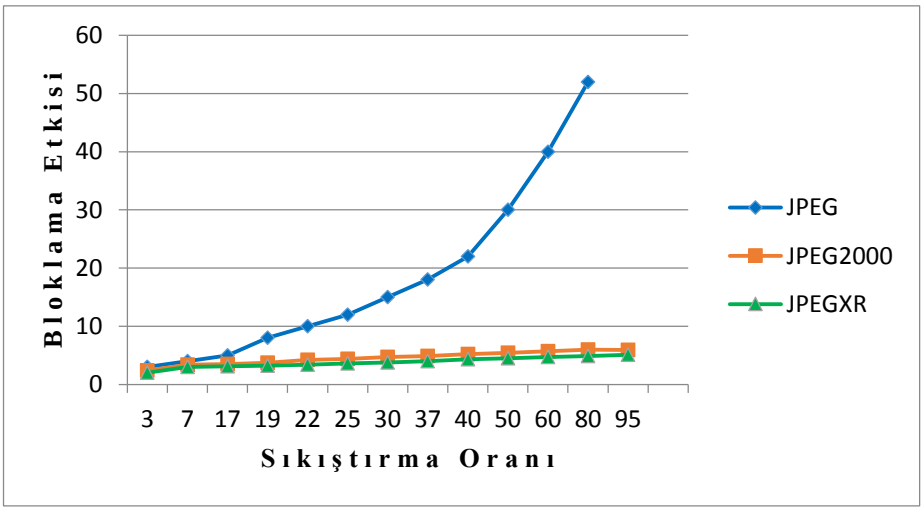
PSNR başlığı altında belirtildiği gibi yüksek PSNR değeri, sıkıştırma sonrası elde edilen görüntünün daha kaliteli olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 2.16'daki PSNR değerleri incelenirse, sıkıştırma oranı arttıkça JPEG ile diğer teknolojiler arasındaki PSNR farkı (kalite farkı) artmaktadır. Şekil 2.15'te yer alan görüntü üzerinden kalite değerlendirmesi yapılacak olursa JPEGXR teknolojisinin PSNR değeri, JPEG2000 ve JPEG teknolojilerine oranla sırasıyla 1 dB ve 2 dB daha fazladır. İlgili PSNR değerleri, dB formülüne uygulanırsa JPEGXR teknolojisinin JPEG2000 teknolojisine göre %25, JPEG teknolojisine göre %60 oranında daha kaliteli sıkıştırma gerçekleştirdiği görülmektedir.

$$\text{dB} = 10\log\frac{\text{JPEGXR}}{\text{JPEG2000}} = 1\ \text{dB},\ \frac{\text{JPEGXR}}{\text{JPEG2000}} = 1.25\ (\%25) \qquad \text{(E 2.19)}$$

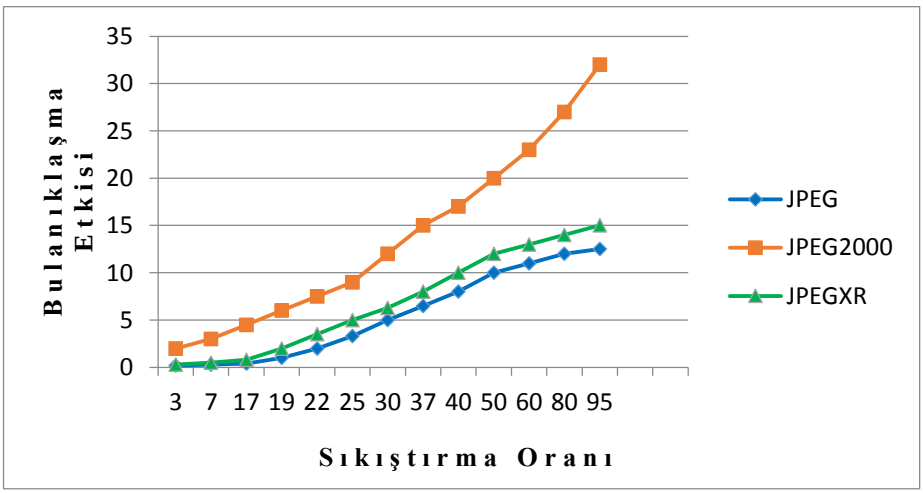
$$\text{dB} = 10\log\frac{\text{JPEGXR}}{\text{JPEG}} = 2\ \text{dB},\ \frac{\text{JPEGXR}}{\text{JPEG2000}} = 1.60\ (\%60) \qquad \text{(E 2.20)}$$

JPEG2000, dönüşüm için DWT yöntemini, JPEGXR ise FCT yöntemini kullanmaktadır. DWT ve FCT dönüşüm sırasında kayıp yaşamazken DCT yöntemi, kayıp yaşamaktadır. JPEG teknolojisinin DCT dönüşümünü kullanması nedeniyle sıkıştırma sonrası elde edilen görüntüde bloklama etkisi oluşmaktadır. JPEG2000 teknolojisinde ise DWT dönüşümü nedeniyle sıkıştırma sonrası bulanıklaşma etkisi oluşmaktadır. JPEGXR teknolojisinin kullanmış olduğu FCT yöntemi, bloklama ve bulanıklaşma etkilerini asgari seviyeye düşürmektedir. Bu bilgiler ışığında

Şekil 2.15'te gösterilen orijinal görüntü ilgili teknolojiler aracılığıyla farklı oranlarda sıkıştırılarak bloklama ve bulanıklaşma etkisi ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.17 ve 2.18'de gösterilmektedir.



Şekil 2.17 JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR bloklama etkisi



Şekil 2.18 JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR bulanıklaşma etkisi

Sıkıştırılan görüntülerde oluşan bloklama etkisi en fazla JPEG, bulanıklaşma etkisi ise en fazla JPEG2000 teknolojisinde görülmüştür. JPEGXR teknolojisinde ise bloklama ve bulanıklaşma etkileri daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir.

JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR teknolojileri 1:200 oranına kadar sıkıştırma desteği sunmaktadır. Sıkıştırma verimliliği iki farklı şekilde değerlendirilmektedir.

Birincisi, eğer sabit bir sıkıştırma oranı (veri boyutu) seçilirse JPEGXR ve JPEG2000 ile sıkıştırılan görüntülerin kalitesi, JPEG ile sıkıştırılan görüntülere göre daha yüksektir. İkincisi ise sıkıştırma işlemi sonrası aynı kalite değeri elde edilmek isteniyorsa JPEG ile sıkıştırılan görüntülerin veri boyutu, JPEGXR ve JPEG2000 ile sıkıştırılan görüntülerin veri boyutunun iki katıdır. JPEG2000 ve JPEGXR çoğu anlamda benzerlik taşımaktadır. Ancak, bulanıklaşma etkisi ve sıkıştırma süresinin az olması JPEGXR teknolojisini bir adım öne çıkarmaktadır.

2.3. SES SIKIŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ

Ses sıkıştırma teknolojileri, kayıplı ve kayıpsız olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kayıpsız ses sıkıştırma teknolojilerinde sıkıştırma sonrası elde edilen ses verisi kaliteli olmasına rağmen veri boyutu oldukça fazla olup genellikle profesyonel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Kayıplı ses sıkıştırma teknolojilerinde ise sıkıştırma sonrası elde edilen ses verisi ortalama bir kalitede olmasına rağmen veri boyutu oldukça düşüktür. Ayrıca, bu kalite düşüklüğünün insan duyu organları tarafından algılanabilmesi oldukça zordur. Sayısal televizyon ve radyo yayıncılığının yanı sıra internet üzerinden veri iletimi ve depolama gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

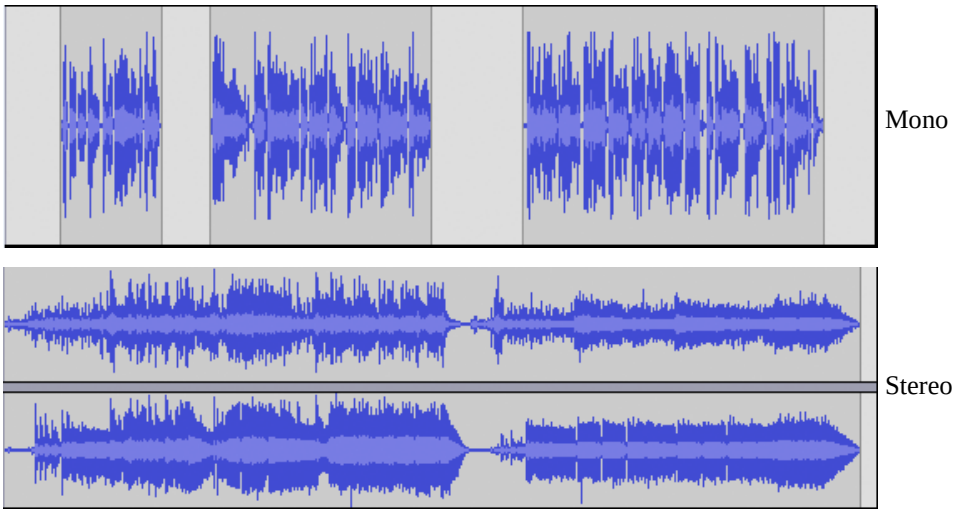
2.3.1. Temel Kavram ve Teknikler

Ses, atmosferde canlıların işitme organları tarafından algılanabilen periyodik basınç değişimleri olup oluşumu itibariyle analog yapıdadır. Sesin analog yapıya sahip olması kopyalama, sıkıştırma, iletilme gibi işlemlerin yapılmasını zorlaştırmaktadır. Söz konusu işlemlerin yapılabilmesi için ses verileri sayısallaştırılmalıdır. Sayısal ses elde etmek için kullanılan en popüler teknik, PCM (Pulse Code Modulation) adı verilen darbe kod modülasyonudur.

2.3.1.1. Kanal Sayısı

Kanal sayısı, sayısal ses verilerinin kaç farklı kanal aracılığı ile oluşturulduğunu gösteren bir parametredir. Tek kanallı sesler, mono; çift kanallı sesler, stereo; dört kanallı sesler, quad ve 5.1 kanal ve üzerindeki sesler, surround olarak adlandırılmaktadır.[62]

Mono ve stereo ses farkına ilişkin örnek verilecek olursa müzik dinlerken değişik enstrümanlara ait sesler farklı hoparlörlerden aynı şekilde geliyorsa mono, farklı şekilde ve derinlikli geliyorsa stereo olarak adlandırılmaktadır. Mono sesler derinlikten yoksunken stereo sesler gerçek hayatta duymuş olduğumuz sesler gibi farklı yönlerden geliyormuş hissi uyandırır ve derinliklidir. Stereo sesler, mono seslerin iki katı veri boyutu ile temsil edilmektedir. Quad ve surround sistemlerde ise derinlik çok daha fazladır. Profesyonel sinema kayıtları izleyicide gerçek hissi uyandırabilmek için çok kanallı sistemlerle oluşturulmaktadır. Çok kanallı sesler istenilirse mono olarak dönüştürülebilir fakat tersi mümkün değildir. Şekil 2.19'da mono ve stereo sesler gösterilmektedir. İlgili şekilde stereo sesin, farklı iki kanala sahip olduğu ve bu iki kanalın birleşiminin mono sesi oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 2.19 Mono ve stereo ses [63]

[62] Milli Eğitim Bakanlığı, *Fotoğraf, Ses ve Video Formatları*, Milli Eğitim Bakanlığı Öğrenim Materyali, Ankara, 2011, s.11.
[63] http://manual.audacityteam.org/o/man/mixing.html (14.08.2015)

2.3.1.2. Örnekleme Frekansı

Bir analog ses sinyalinin sayısallaştırılmasında en önemli adım örneklemedir. Doğru örnekleme için ise örnekleme frekansının iyi belirlenmesi gerekmektedir. Örnekleme frekansı Nyquist teoremine göre belirlenir ve bir sinyali oluşturan en büyük frekans bileşeni f_0 ise, örnekleme frekansı en az $2f_0$ büyüklüğünde olmalıdır.

İnsan kulağı 20 Hz - 20 kHz aralığında oluşturulan seslere duyarlı olduğu için ses CD'leri 20 kHz'in iki katından büyük olan 44.1 kHz ile örneklenmektedir. İnsan sesi (konuşma sesi) maksimum 4 kHz büyüklüğe çıkabildiği için telekonferans, telefon ve internet üzerinden görüntülü konuşma gibi profesyonel olmayan uygulamalarda örnekleme frekansı olarak 4 kHz'in iki katı olan 8 kHz seçilmektedir.[64] Tablo 2.5'te çeşitli uygulamalar için seçilen örnekleme frekansları gösterilmektedir.

Tablo 2.5 Çeşitli uygulamalar için kullanılan örnekleme frekansları

Örnekleme Frekansı	Uygulama Alanı
8 kHz	Telefon, telekonferans vb.
22.05 kHz	Radyo
32 kHz	Sayısal ses kaydediciler
44.1 kHz	CD'lere kaydedilen sesler
48 kHz	Sayısal TV Yayıncılığı, DVD filmler
96 kHz - 192 kHz	HD - DVD, DVD'lere kaydedilen sesler

2.3.1.3. Bit Derinliği

Bit derinliği, analog ses sinyalini sayısala dönüştürürken saniyede alınan örnek sayısıdır. Bit derinliğinin yüksekliği, sinyalin kalitesi ile doğru orantılıdır. CD ortamında saklanan sesler genellikle 16 bit derinliğe sahiptir.

[64] David Marshall ve Kirill Sidorov, *CM3106 Chapter 14: MPEG Audio*, Cardiff University, s.16.

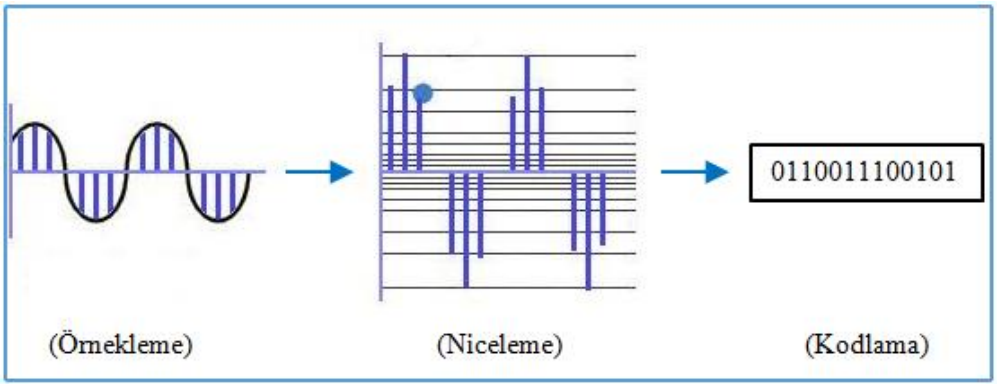
2.3.1.4. Kbit/s Kavramı

Kbit/s değeri, herhangi bir sinyal verisinde saniyede iletilen kilo bit miktarıdır. Sıkıştırılmamış haldeki ses verileri için geçerli olmayan bir değer olup sıkıştırılma esnasında ses verisinin kaç bit ile kodlanacağını belirlemek için kullanılmaktadır. Ses sıkıştırma teknolojilerinde sesin kalitesini belirleyici unsurlardan biridir. Yüksek bit değeri kullanılarak sıkıştırılan ses verileri, düşük bit değeri kullanılarak sıkıştırılan ses verilerinden daha fazla yer kaplamasına rağmen daha kalitelidir. Ses verisine ait kbit/s değeri, Eşitlik 2.21 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{kbit/s} = \text{Örnekleme Hızı} \times \text{Bit Derinliği} \times \text{Kanal Sayısı} \qquad \text{(E 2.21)}$$

2.3.1.5. PCM (Pulse Code Modulation)

PCM tekniği, analog ses sinyalinin sayısal dönüşümünü gerçekleştirmek amacıyla geliştirilmiştir. PCM'den önce farklı teknikler kullanılmış olsa da bu dönüşümü en verimli ve kayıpsız gerçekleştiren PCM olmuştur. PCM tekniğinin adımları Şekil 2.20'de gösterilmektedir.



Şekil 2.20 PCM tekniği adımları

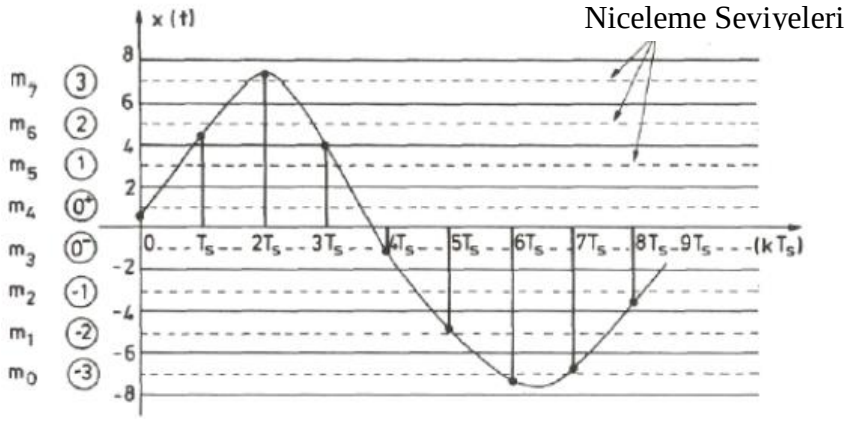
Örnekleme işlemi, Nyquist teoremine göre belirlenen örnekleme frekansı kullanılarak gerçekleştirilir. Örnekleme frekansı $2f_0$ büyüklüğünde ise analog ses sinyalinden $1/2f_0$ aralıklarla değer alınır.

Niceleme işlemi, analog ses sinyalinin minimum ve maksimum genlikleri arasının basamaklara ayrılması ve bu basamaklara karşılık gelen yaklaşık değerin elde edilmesidir. Niceleme aralığı ne kadar düşük olursa orijinal sinyale o oranda yaklaşılır. Ancak bu durum sinyalin daha fazla bit ile tanımlanabilmesine yol açmakta ve sayısallaşan sinyalin veri boyutu artmaktadır. Niceleme aralığı, Eşitlik 2.22 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Niceleme Aralığı} = \frac{A_{max} - A_{min}}{2^n} \qquad \text{(E 2.22)}$$

A_{max} = Analog ses sinyalinin maksimum genliği
A_{min} = Analog ses sinyalinin minimum genliği
n = Sinyalin ikilik sisteme göre kodlanacağı bit miktarı

Ses sinyallerinin kaliteli bir şekilde sıkıştırılabilmesi için 16 bit ve üzeri değerlerde kodlanması gerekmektedir. Kodlama 8 bit olarak gerçekleştirilirse sıkıştırma sonucu elde edilen ses boyutu yarı-yarıya azalmakta ancak istenilen kalitede olmamaktadır. Şekil 2.21'de niceleme aralığının belirlenmesi ve niceleme işlemi gösterilmektedir.[65]



Şekil 2.21 PCM tekniği niceleme işlemi

Şekil 2.21'de gösterilen analog sinyalin en büyük genliği +8, en küçük genliği -8 olup her niceleme aralığı 3 bit olarak kodlanmaktadır. Bu bilgiler ışığında niceleme aralığı Eşitlik 2.23 yardımıyla 2 birim olarak hesaplanmaktadır.

[65] Milli Eğitim Bakanlığı, *Bilişim Teknolojileri: Haberleşme Teknikleri*, Milli Eğitim Bakanlığı Öğrenim Materyali, Ankara, 2013, s.32.

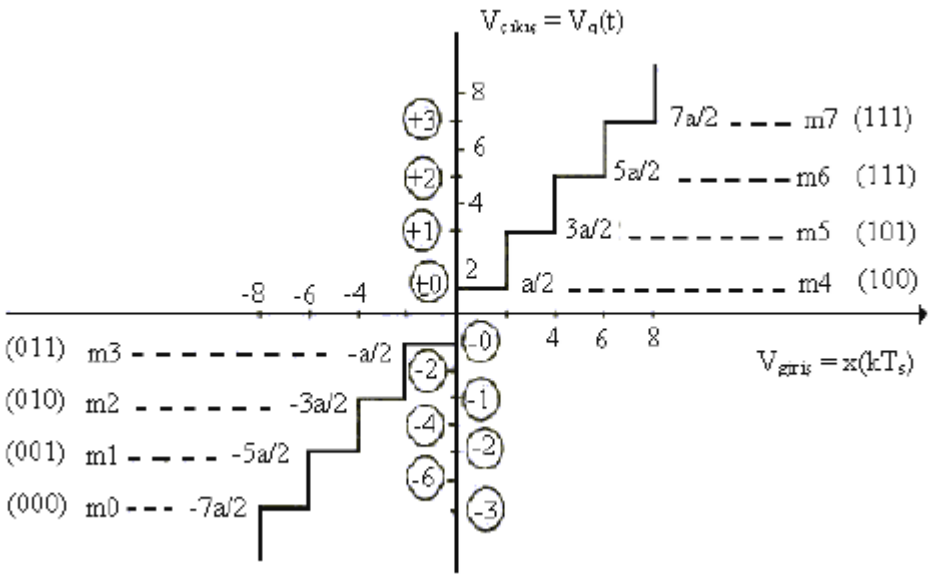
$$\text{Niceleme Aralığı} = \frac{A_{max} - A_{min}}{2^n} = \frac{8-(-8)}{2^3} = 2 \text{ br.} \qquad \text{(E 2.23)}$$

Hesaplanan niceleme aralığına göre çeşitli analog ses sinyal genliklerinin niceleme seviyeleri Tablo 2.6'da gösterilmektedir.

Tablo 2.6 Niceleme seviyeleri

Örneklenen Analog Sinyalin Genliği	Niceleme Aralığı	Niceleme Seviyesi
-2.817	-2 Volt, -4 Volt	-1
2.532	2 Volt, 4 Volt	+1
6.432	6 Volt, 8 Volt	+3
-0.032	0 Volt, -2 Volt	0

Kodlama işlemi, niceleme işleminden sonra belirlenen aralıklara göre ikilik sisteme göre gerçekleştirilir Sinyalin sayısal olarak ifade edildiği adım kodlama adımıdır. Kodlama işleminden sonra ses sinyali, kayıpsız veya kayıplı olarak sıkıştırılabilir. Şekil 2.22'de kodlama işlemi gösterilmektedir.



Şekil 2.22 PCM tekniği kodlama işlemi [66]

Analog ses sinyalinin genlik değerlerine karşılık gelen niceleme seviyeleri 000'dan başlamak üzere 111'e kadar 3 bitten oluşacak şekilde kodlanır. Tablo 2.6'da gösterilen niceleme seviyelerinin kodlanmış hali Tablo 2.7'de gösterilmektedir.

[66] a.g.e, s.32.

Tablo 2.7 Kod değerleri

Örneklenen Analog Sinyalin Genliği	Niceleme Aralığı	Kod Değeri
-2.817	-2 Volt, -4 Volt	010
2.532	2 Volt, 4 Volt	101
6.432	6 Volt, 8 Volt	111
-0.032	0 Volt, -2 Volt	011

Analog ses sinyalinin sayısal dönüşümü gerçekleştirildikten sonra sıkıştırılması kayıpsız ve kayıplı olmak üzere iki farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Sayısal yayıncılık gibi frekans spektrumu verimliliğinin önemli olduğu alanlarda kayıplı ses teknolojileri kullanılmaktadır.

2.3.2. Kayıpsız Ses Sıkıştırma Teknolojileri

Kayıpsız ses sıkıştırma teknolojileri, PCM tekniği ile analogdan sayısala dönüştürülen ses sinyalinin herhangi bir kayba uğramadan sıkıştırılmasını sağlamaktadır. Genellikle en ufak ses bileşenlerinin dahi önemli olduğu profesyonel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Kayıpsız ses sıkıştırma işlemi iki farklı yöntem aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. İlk yöntem, analog ses sinyalinin sadece sayısal dönüşümünün gerçekleştirilmesi şeklinde olup herhangi bir sıkıştırma işlemi gerçekleşmez ve veri boyutunda en ufak bir kayıp dahi yaşanmaz. İkinci yöntemde ise sinyalde sıkıştırma işlemi gerçekleşir ve veri boyutu azalır.

2.3.2.1. WAV (Waveform Audio File Format)

WAV formatı, kişisel bilgisayarlarda ses dosyalarını saklamak için IBM ve Microsoft tarafından geliştirilmiştir. Windows işletim sistemi bulunan bilgisayarlarda kullanılmaktadır. WAV formatı kullanılarak saklanan seslerin veri boyutu orijinal

sinyal ile birebir aynıdır. Dolayısıyla PCM tekniği sonrası analogdan sayısala dönüşümü gerçekleştirilen orijinal ses sinyalinin boyutu ile WAV formatında saklanan ses sinyalinin boyutu aynıdır. WAV formatı 44.1 kHz örnekleme frekansı ve 16 bit kodlamayı desteklemektedir. Orijinal ses sinyali ile aynı kaliteyi sunması rağmen veri boyutunda kazanç sağlamadığı için çok tercih edilmemektedir.

2.3.2.2. AIFF (Audio Interchange File Format)

AIFF formatı, kişisel bilgisayarlarda ses dosyalarını saklamak için Apple tarafından geliştirilmiştir. Macintosh işletim sistemi bulunan bilgisayarlarda kullanılmaktadır. AIFF ve WAV formatları arasında farklı işletim sistemlerini desteklemelerinin dışında herhangi bir farklılık yoktur. WAV formatında sıralanan özelliklerin tamamı AIFF için de geçelidir.

2.3.2.3. FLAC (Free Lossless Audio Codec)

FLAC, 2000 yılında Josh Coalson tarafından geliştirilmiş ve 2003 yılında standarda kavuşmuş bir kayıpsız ses sıkıştırma teknolojisidir. WAV ve AIFF teknolojilerinin aksine sıkıştırma sonrası ses verisinin boyutunda düşüş sağlamaktadır. WAV ve AIFF teknolojileri kullanılarak saklanan sesler, FLAC ile sıkıştırıldığında veri boyutunda yaklaşık %50 kazanç elde edilmektedir.

2.3.2.4. ALAC (Apple Lossless Audio Codec)

ALAC, 2004 yılında Apple tarafından sadece Macintosh işletim sistemine sahip bilgisayarda kullanılmak için üretilmiş ve 2011 yılında tüm işletim sistemlerinin kullanımına açılmış bir kayıpsız ses sıkıştırma teknolojisidir. FLAC

teknolojisinde olduğu gibi ALAC ile sıkıştırılan ses verilerinin boyutunda yaklaşık %50 kazanç elde edilmektedir.

2.3.3. Kayıplı Ses Sıkıştırma Teknolojileri

Kayıplı ses sıkıştırma teknolojileri, insan kulağının duyma aralığı dışında kalan ses bileşenlerinin çıkartılması prensibine dayanmaktadır. Kayıpsız ses sıkıştırma teknolojilerinin aksine kayıplı ses sıkıştırmada, sıkıştırma sonrası elde edilen sinyal orijinal sinyal ile ciddi farklılıklar göstermektedir.

Bir ses sinyalinin ana karakteristiğini oluşturan bileşenler alçak frekans bileşenleri olup yüksek frekans bileşenleri ayrıntıları içermektedir. Dolayısıyla sıkıştırma işlemi gerçekleştirilirken yüksek frekans bileşenlerinin sinyalden çıkartılması sinyalin ana karakteristiğini bozmamaktadır. Kayıplı ses sıkıştırma teknolojilerinde, yüksek frekans bileşenlerinin belirlenmesi için HPF (High Pass Filter) ve alçak frekans bileşenlerinin belirlenmesi için LPF (Low Pass Filter) filtreler kullanılmaktadır.

2.3.3.1. MP3 (Moving Picture Expert Group - Audio Layer 3)

MP3 teknolojisinin geliştirilmesine ilişkin çalışmalar 1988 yıllarına dayanmaktadır. 1988 yılında ISO tarafından sayısal video kodlama standardının belirlenmesi için bir toplantı düzenlenmiştir. Bu toplantıda, sayısal videoların içeriğini oluşturan görüntü ve ses bileşenleri için ayrı ayrı çalışma grupları oluşturulmuştur. Ses bileşenlerinin kodlanması için oluşturulan grup Layer 1, Layer 2 ve Layer 3 olmak üzere 3 farklı kodlama yöntemi geliştirmiş ve Layer 3, en düşük bant genişliğini kullanarak en yüksek ses kalitesi sunan yöntem olmuştur.[67] 1992 yılında ISO, Layer 3 yönteminin olumlu özelliklerine rağmen karmaşık bir

[67] http://www.chip.com.tr/haber/mp3-formatinin-tarihi.-paylasim-aglari_26163_7.html (11.08.2015)

yapıya sahip olmasından dolayı dünya genelinde Layer 2 yönteminin kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Bu gelişme üzerine Layer 3 grubu, yöntemlerini pazarlayabilecekleri farklı alanlar aramaya başlamış ve sayısal telefon hatları üzerinden ses aktarımı yapan bir şirketle anlaşmıştır. Bu anlaşmanın etkisiyle Layer 3 ekibi, yöntemlerinin internet ses standardı olmasına karar vermiş ve ".mp3" adında dosya uzantısı geliştirmiştir. İlgili dosya uzantısının resmiyet kazandığı tarih olan 7 Temmuz 1994 MP3 teknolojisinin başlangıcı olarak kabul edilmektedir. MP3, MPEG - 1 ve MPEG - 2 video sıkıştırma standartlarının ses sıkıştırma bölümünü oluşturmaktadır.

MP3, 32 - 320 kbit/s aralığında olmak üzere çok farklı bit değerlerinde kodlama ve 32 kHz, 44.1 kHz, 48 kHz olmak üzere 3 farklı örnekleme frekansında ses sıkıştırma imkânı sunmaktadır. Farklı bit ve örnekleme frekansı değerlerine göre değişse de yaklaşık 1:12 oranında sıkıştırma yapabilmekte ve 5.1 kanala kadar destek vermektedir.[68]

2.3.3.2. AAC (Advanced Audio Coding)

AAC, MP3 temel alınarak geliştirilmiş kayıplı ses sıkıştırma teknolojisidir. AAC, 1997 yılında MPEG-2 video sıkıştırma standardına MP3 teknolojisinin ardından eklenmiş ve ISO/IEC 13818 - 7 ismiyle yılında standart haline getirilmiştir.

AAC, MP3 teknolojisinin desteklediği bit değerlerinde kodlama yapabilmesinin yanı sıra 8 - 96 kHz aralığında olmak üzere çok çeşitli örnekleme frekanslarında ses sıkıştırma imkânı sunmaktadır. Farklı bit ve örnekleme frekanslı değerlerine göre değişse de yaklaşık 1:13 sıkıştırma yapabilmektedir.[69]

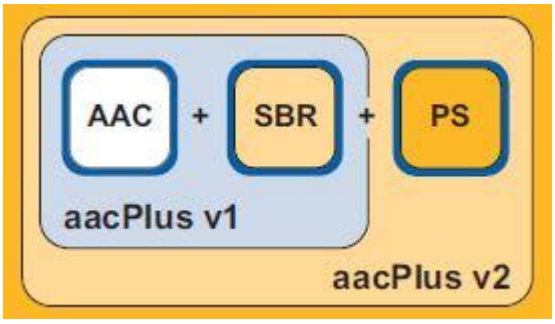
[68] Karlheinz Brandenburg, *MP3 and AAC Explained*, Fraunhofer Institute for Integrated Circuits FhG-IIS A, Almanya, 1999, s.3.
[69] a.g.k., s.5-8.

2.3.3.3. HE-AAC (High Efficiency Advanced Audio Coding)

HE-AAC diğer adıyla aacPlus, AAC teknolojisini temel alarak üretilmiş ve daha gelişmiş bir sürümdür. 1999 yılında geliştirilen MPEG-4 video sıkıştırma standardının ses bölümünü oluşturmaktadır.

HE-AAC'nin AAC teknolojisine göre daha kaliteli sıkıştırma yapabilmesi SBR (Spectral Band Replication) özelliğinin eklenmesiyle gerçekleşmiştir. SBR özelliğinin eklenmesiyle HE-AAC, 2003 yılında güncellenmiş ve aacPlus v.1 adını almıştır. SBR, MP3 teknolojisine de eklenmiş ve oluşan yeni sisteme mp3PRO adı verilmiştir. SBR, yüksek frekansa sahip ses bileşenlerini daha düşük veri boyutuyla temsil ederek alçak ve yüksek frekans bileşenleri arasındaki uyumsuzluğu azaltmaktadır. Örnek verilecek olursa bit oranı 48 kbit/s olan stereo ses sıkıştırılırken ilgili ses verisine ait 40 kbit/s büyüklüğündeki alçak frekans bileşenleri AAC ile 8 kbit/s büyüklüğündeki yüksek frekans bileşenleri SBR ile sıkıştırılmaktadır.

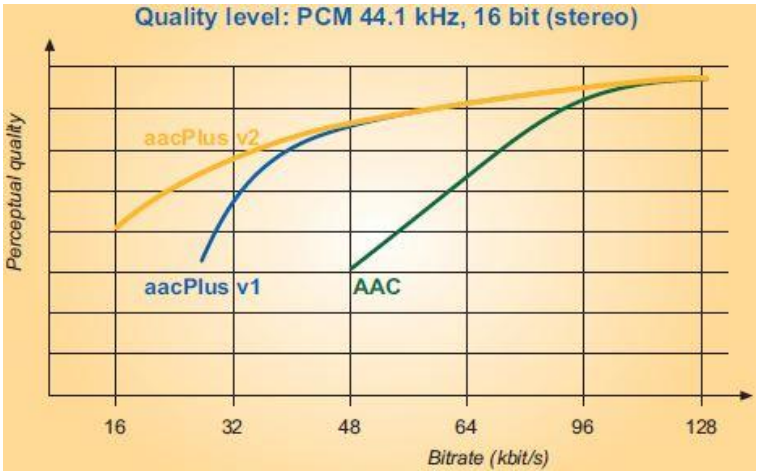
HE-AAC teknolojisine SBR özelliğinin eklenmesinden sonra 2004 yılında parametrik stereo adı verilen farklı bir özellik daha eklenmiştir. Parametrik stereo özelliğinin eklenmesiyle HE-AAC, 2004 yılında güncellenmiş ve aacPlus v.2 adını almıştır. Ses çok kanallı kodlanırken sıkıştırma sonrası kanallardan gelen sesler arasında ufak senkronizasyon farkları oluşmaktadır. Parametrik stereo özelliği sayesinde bu sorun giderilmektedir. HE-AAC teknolojisinin AAC, SBR ve parametrik stereo özellikleri ile nasıl çalıştığı Şekil 2.23'te gösterilmektedir.



Şekil 2.23 HE-AAC (aacPLUS v.1 ve v.2) mimarisi [70]

[70] Stephan Meltzer ve Gerald Moser, *MPEG-4 HE-AAC v2: audio coding for today's digital media world*, EBU Technical Review, 2006, s.2.

HE-AAC sürümlerine ait karşılaştırma (sıkıştırma verimliliği) Şekil 2.24'te gösterilmektedir. İlgili şekil incelendiğinde aacPlus v.2 ve aacPlus v.1 sürümlerinin düşük bit oranlı sıkıştırmada AAC teknolojisine göre çok daha verimli olduğu görülmektedir.



Şekil 2.24 AAC, aacPlus v.1 ve aacPlus v.2 teknolojilerinin karşılaştırılması [71]

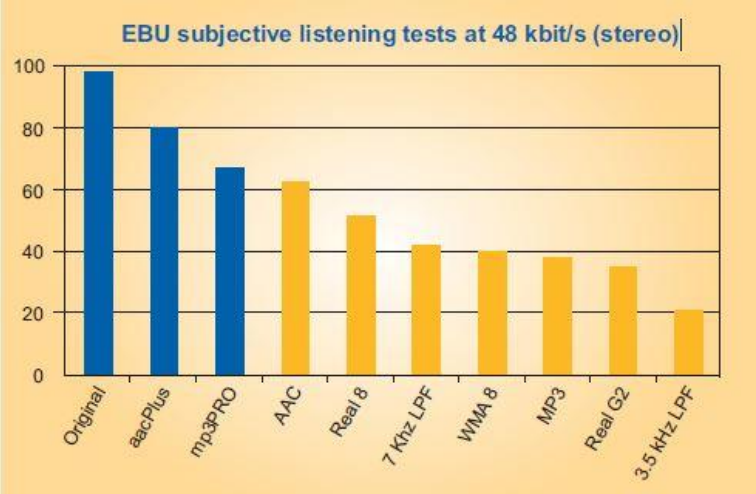
HE-AAC, sayısal radyo (DAB: Digital Audio Broadcasting ve DRM: Digital Radio Mondiale vb.) ve TV (DVB-T2, DVB-S2 vb.) yayıncılığında temel ses sıkıştırma teknolojisi olarak kabul edilmektedir. Sayısal yayıncılığın yanı sıra Apple tarafından üretilen bütün ürünlerde, Youtube, Facebook vb. gibi video paylaşım sitelerinin tamamında HE- AAC teknolojisi kullanılmaktadır.

2.3.3.4. Kayıplı Ses Sıkıştırma Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Avrupa Yayın Birliği (EBU) tarafından 2003 yılında farklı kayıplı ses sıkıştırma teknolojilerinin verimliliklerini karşılaştırmak amacıyla bir test gerçekleştirilmiştir. Test kapsamında orijinal ses verisinin yanı sıra HE-AAC (aacPlus), AAC, MP3, mp3PRO ve Microsoft tarafından geliştirilen WMA (Windows Media Audio) teknolojileri ile aynı sıkıştırma oranında sıkıştırılan ses verileri bir dinleyici grubuna MUSHRA adı verilen bir yöntemle dinletilmiştir.

[71] a.g.m., s.9.

MUSHRA yönteminde dinleyicilere öncelikle orijinal ses verisi ardından ilgili teknolojiler ile sıkıştırılan ses verileri dinletilmiş ve 0 - 100 puan aralığında değerlendirmeleri istenmiştir. Dinleyiciler, puanlamayı hangi teknolojiye ait ses verisini dinlediklerini bilmeden gerçekleştirmiştir. Şekil 2.25'te test sonuçları gösterilmektedir.[72]



Şekil 2.25 Kayıplı ses sıkıştırma teknolojilerinin karşılaştırılması

Test sonucunda HE-AAC, mp3PRO, AAC, MP3 ve teknolojileri ile sıkıştırılan sesler sırasıyla 80, 68, 62 ve 39 puan almıştır. Dolayısıyla aynı sıkıştırma oranında en kaliteli ses verisi HE-AAC teknolojisi kullanılarak elde edilmiştir.

2.3.4. Kayıplı ve Kayıpsız Ses Sıkıştırma Teknolojilerinin Veri Boyutu Açısından Karşılaştırılması

Kayıpsız ses sıkıştırma teknolojileri, kayıplı ses sıkıştırma teknolojilerine oranla daha kaliteli sıkıştırma yapmaktadır. Ancak, kayıpsız teknolojilerin daha az tercih edilmesindeki en önemli neden sıkıştırma sonrası veri boyutunun çok fazla düşürülememesidir. Kayıplı teknolojiler, insan duyu organları tarafından algılanamayacak verilerin atılmasını sağlayarak dosya boyutlarında dramatik düşüşler sağlamaktadır. Bu nedenle sayısal yayıncılık gibi frekans spektrumunun

[72] a.g.m., s.7.

verimli kullanımının hayati öneme sahip olduğu uygulamalarda en verimli sıkıştırma imkânı sunan HE-AAC kullanılmaktadır.

Kayıplı ve kayıpsız ses sıkıştırma teknolojilerinin veri boyutu açısından karşılaştırılabilmesi amacıyla WAV (Örnekleme Frekansı: 44.1 kHz, Bit Derinliği: 48 kbit/s, Kodlama: 16 bit) formatındaki ses verisi FLAC, MP3, AAC ve HE-AAC teknolojileri ile sıkıştırılarak karşılaştırılmıştır. WAV, orijinal analog ses sinyali ile en fazla benzerliğe sahip sayısal ses formatı olduğu için tercih edilmiştir. Tablo 2.8'de farklı formatlara dönüştürülen ses verisinin veri boyutu gösterilmektedir.

Tablo 2.8 FLAC, MP3, AAC ve HE-AAC teknolojilerinin karşılaştırılması

Ses Verisinin Formatı	Ses Verisinin Boyutu	Sıkıştırma Oranı (~)
WAV	23.8 Megabayt	-
FLAC	13.3 Megabayt	~1:2
MP3	1.34 Megabayt	~1:17
AAC	1.18 Megabayt	~1:20
HE-AAC	1.08 Megabayt	~1:22

Tablo 2.8 incelendiğinde en yüksek sıkıştırma oranı sırasıyla HE-AAC, AAC, MP3 ve FLAC teknolojileri aracılığı ile elde edilmiştir. Kayıpsız ses sıkıştırma teknolojisi olan FLAC ile en düşük seviyede sıkıştırma oranı elde edilmiştir. Kayıpsız teknolojiler düşük sıkıştırma oranları nedeniyle sayısal yayıncılığın yanı sıra internet üzerinden veri aktarımında çok fazla tercih edilmemektedir.

HE-AAC teknolojisi diğer kayıplı teknolojilerle kıyaslandığında aynı sıkıştırma oranının seçilmesi durumunda daha kaliteli ses içeriği oluştururken (Bkz. s.72) aynı kalite oranının seçilmesi durumunda daha yüksek sıkıştırma oranı elde ederek ses verisinin daha düşük veri boyutlarında temsil edilmesini sağlamaktadır. HE-AAC teknolojisi bu özelliklerinin yanı sıra çok çeşitli örnekleme frekansları ve bit derinliklerinde sıkıştırma imkânı sunmaktadır. HE-AAC teknolojisi, esnek yapısı ve verimliliği sayesinde sayısal radyo ve televizyon yayıncılığının yanı sıra ses verisini konu alan her platformda kullanılmaktadır.

2.4. VİDEO SIKIŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ

Video, birden fazla durağan görüntünün bir araya getirilmesiyle oluşturulmakta ve veri boyutu olarak bu tez kapsamında incelenen görüntü ve ses verilerinden çok daha fazla yer kaplamaktadır.

Video verileri, internet ağı üzerinden veya sayısal yayıncılık aracılığıyla iletilirken çok ciddi oranda bant genişliği harcamakta ve depolanması sorun teşkil etmektedir. Günümüzde kamera teknolojisinin de gelişimiyle beraber çok daha kaliteli görüntüler izleyicilere sunulmaktadır. Özellikle HD, 4K ve 8K görüntü teknolojilerinin yaygınlaşması video boyutlarını ciddi oranda arttırmıştır. Sayısal yayıncılık bölümünde de anlatıldığı gibi bu durum frekans spektrumunda darlığa yol açmakta ve bu sorunun çözümü sıkıştırma teknolojilerinin kullanımından geçmektedir.

Video sıkıştırma teknolojileri kayıpsız ve kayıplı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Ancak video veri boyutunun çok yüksek olmasından dolayı kayıpsız teknolojiler çoğu platformda neredeyse hiç kullanılmamaktadır.

1990 yılından itibaren ITU ve ISO/IEC tarafından sırasıyla ITU-T H.261, ISO-IEC MPEG-1, ISO-IEC MPEG-2, ITU-T H.263 ve ISO/IEC MPEG-4 teknolojileri geliştirilmiştir. ITU ve ISO/IEC organizasyonlarının yapmış olduğu çalışmalar 2001 yılına kadar birbirlerinden bağımsız olarak devam etmiştir. 2001 yılında ITU-T'ye bağlı VCEG ve ISO/IEC'e bağlı MPEG grupları bir araya gelerek JVT grubunu oluşturmuştur. Bu grup günümüzde hala sayısal yayıncılıkta önemini koruyan ve 2003'te standart haline gelen MPEG-4 Part10, bilinen adıyla H.264/AVC ve 2013'te standart haline gelen H.265/HEVC teknolojilerini geliştirmiştir.[73]

[73] Djordje Mitrovic, *Video Compression*, University of Edinburg, 2012, s.3.

H.261, ilk sayısal video sıkıştırma teknolojisi olarak kabul edilmektedir. H.261, ISDN (Integrated Services Digital Network) hatlarında video telefon ve video konferans gibi uygulamaların kullanılması için 1980'li yılların sonunda ITU-T tarafından geliştirilmiştir.[74]

MPEG grubunun ilk standardı olan MPEG-1, ISO/IEC tarafından 1993 yılında standart haline getirilmiştir. CD'lere VHS kalitesinde ses ve görüntü kaydı yapabilmek ve kayıtlı veriye hızlı ulaşım amacıyla geliştirilmiştir. Popüler ses sıkıştırma teknolojisi MP3, MPEG-1 teknolojisinin ses kısmını oluşturmaktadır. Blok temelli hareket dengelemesi, ayrık kosinüs dönüşümü vb. video kodlama yöntemlerini kullanmaktadır.[75]

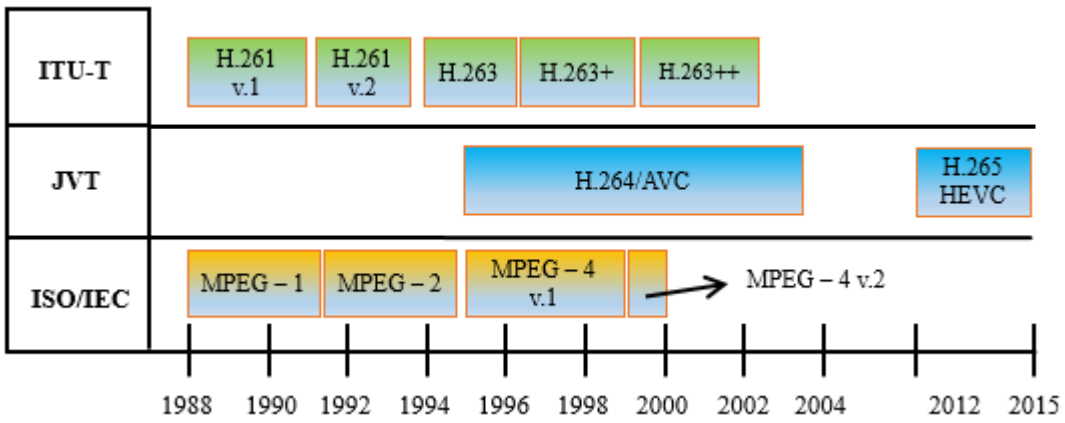
MPEG-2, MPEG-1 teknolojisinin yetersiz kalması üzerine 1994 yılında geliştirilmiş ve standart haline getirilmiştir. Geliştirilmesindeki temel amaç, SD televizyon yayınlarının sıkıştırılmasıdır. MPEG-2 teknolojisi, ilk kez sayısal televizyon yayıncılığında kullanılması bakımından oldukça önemlidir.

H.263, videonun ağ üzerinden gerçek zamanlı iletiminin önemli olduğu kablosuz ağlarda ve PSTN (Public Switched Telephone Network) hatları üzerinden video konferans, video ile güvenlik gözetimi gibi uygulamalarda kullanılmak üzere ITU-T tarafından geliştirilmiştir. H.261 teknolojisine oranla iki kat daha fazla veri kazancı sağlamaktadır.[76]

MPEG-4 teknolojisi etkileşimli TV, internet video gibi yeni nesil çoklu ortam uygulamalarından kullanılmak üzere ISO/IEC tarafından 1995-1999 yılları arasında geliştirilmiş ve 1999 yılında standart haline getirilmiştir. H.263 temel alınarak geliştirilmiş olan MPEG-4 teknolojisinin getirmiş olduğu en büyük yenilik kendisinden önce geliştirilen MPEG-1 ve MPEG-2 teknolojilerine oranla iki kat daha

[74] D. Marshall ve K. Sidorov, s.12.
[75] D. Mitrovic, 2012, s.3-4.
[76] Soyeb Nagori ve Anurag Jain, *Introduction to Video Compression Techniques*, Texas Instruments Technology: Training Material, s.7.

fazla veri kazancı sağlamasıdır. MPEG-4, kendisinden sonra JVT grubu tarafından geliştirilen H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojilerinin temelini oluşturmaktadır. Şekil 2.26'da video sıkıştırma teknolojilerinin tarihsel gelişimi gösterilmektedir.



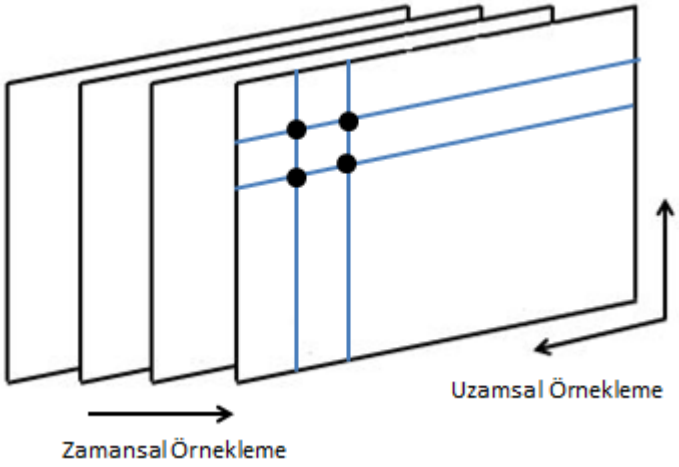
Şekil 2.26 Video sıkıştırma teknolojilerinin tarihsel gelişimi

Genel olarak tüm video sıkıştırma teknolojilerinin temeli görüntü ve ses sıkıştırma teknolojilerinde olduğu gibi artık verinin atılması prensibine dayanmaktadır. MPEG-4, H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojilerinin temeli de aynıdır. Ancak zaman içerisinde farklı kodlama algoritmalarının ve ek özelliklerin geliştirilmesiyle 3 farklı teknoloji arasındaki sıkıştırma verimliliği önemli ölçüde farklılık göstermiştir.

2.4.1. Video Sıkıştırma Teknolojilerinin Genel Yapısı

Video sıkıştırma işlemi, uzamsal ve zamansal örnekleme olmak üzere iki önemli adımdan oluşmaktadır. Uzamsal örnekleme, belirli bir ***t*** anındaki durağan görüntü karesine ait piksellerin benzerliği kullanılarak gerçekleştirilmekte olup görüntü sıkıştırma teknolojileri ile bire bir aynı teknikleri kullanmaktadır. Zamansal örnekleme ise art arda gelen ve farklı ***t*** anlarındaki görüntü karelerine ait piksellerin benzerliği kullanılarak gerçekleştirilmekte olup video sıkıştırma teknolojilerine özgü bir işlemdir. Uzamsal örnekleme, çerçeve içi kodlama (intra frame coding); zamansal örnekleme ise çerçeveler arası kodlama (inter frame coding) olarak

adlandırılmaktadır.[77] Şekil 2.27'de uzamsal ve zamansal örnekleme adımları gösterilmektedir.



Şekil 2.27 Uzamsal ve zamansal örnekleme

Çerçeve içi ve çerçeveler arası kodlama yapılırken 3 farklı türde çerçeve kullanılır. Belirli bir ***t*** anına ait çerçeve I çerçevesi olarak adlandırılırken, ilgili ***t*** anından önceki çerçeve P ve sonraki çerçeve ise B olarak adlandırılmaktadır. Çerçeve içi kodlamada I çerçevesi kullanılırken, çerçeveler arası kodlamada P ve B çerçeveleri kullanılmaktadır. P çerçevesi referans çerçevesi olarak sadece kendisinden önce gelen P veya I çerçevesini temel alırken, B çerçevesi kendisinden önce veya sonra gelen I veya P çerçevesini temel alır. Video kareler arasında keskin geçişlerin olduğu durumlarda I çerçevesi tekrar oluşturulmaktadır. Ancak keskin geçişlerin az olduğu durumlarda ilk başta belirlenen I çerçevesinin değiştirilmemektedir.[78]

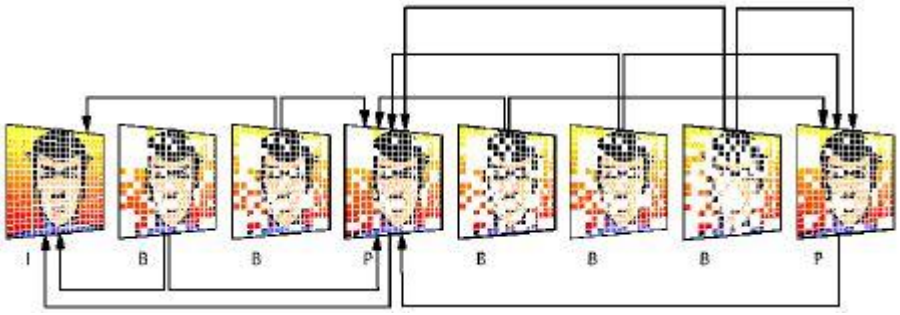
P ve B çerçeveleri kodlanırken ilgili çerçeveden önce veya sonra gelen çerçeveler arasında en fazla benzer bloğa sahip çerçeve referans olarak seçilir. Referans çerçeveyi belirleme aşamasında çerçeveler arasında aynı frekans değerine sahip blokların var olup olmadığının tespit edilmesi için blok karşılaştırma algoritmasından faydalanılır. Blok karşılaştırma algoritmasının aynı frekans değerine

[77] John G. Apostolopoulos, *Video Compression*, Hewlett-Packard Laboratories, 2004, s. 15-29. http://www.slideshare.net/chetanrao2012/videocompression2004 (19.08.2015)
[78] a.g.k., s.15-29.

sahip blokları bulamaması durumunda birbirine en yakın frekans değerine sahip bloklar tercih edilir. Ancak bu durumunda bloklar arasındaki ufak farklılığın da kodlanması gerekmektedir. İlgili farklılık tahmin hatası olarak da adlandırılmaktadır.

Blok karşılaştırma algoritması, kodlanacak çerçeve ile referans çerçeve arasında ortak bir blok bulduğunda tespit edilen blok kodlanmaz. Ancak tespit edilen bloğun yerini belirlemek için hareket vektörü adı verilen bir parametre tanımlanır ve ilgili parametre kodlanır. Hareket vektörünün belirlenmesi işlemine hareket kestirimi adı verilmektedir.

Şekil 2.28'de video sıkıştırma teknolojilerinde kullanılan 3 farklı çerçeve gösterilmektedir. I, sıkıştırma işleminin başında referans alınan çerçeve olduğu için bütün pikselleri kodlanırken I çerçevesinden sonra gelen ve çerçeveler arası kodlamayı sağlayan P ve B çerçevelerine ait piksellerin sadece bir kısmı kodlanmaktadır. Beyaz renkle gösterilen piksel blokları referans alınan çerçeve ile benzer olduğundan kodlanmamaktadır.[79]



Şekil 2.28 Video sıkıştırma teknolojilerinde kullanılan çerçeve türleri

Sayısal yayıncılık aracılığıyla iletilmek üzere oluşturulan bir yayının en az 25 kareden (fps) oluştuğu bilgisinden hareketle çerçeveler arası tahminin sıkıştırma verimliliği açısından ne kadar önemli olduğu daha net anlaşılmaktadır.

[79] C. Taşkın, 2010, s.14.

2.4.2. H.264/AVC (Advanced Video Coding)

H.264/AVC, ITU-T'ye bağlı VCEG ve ISO/IEC'ye bağlı MPEG gruplarının bir araya gelmesiyle oluşturulan JVT grubu tarafından 2003 yılında taslak metni oluşturulan ve 2012 yılında son şeklini alarak standart haline getirilmiş bir video sıkıştırma teknolojisidir. Geliştirilmesindeki temel amaç, kendisinden önce kullanılan teknolojilere göre daha düşük bit oranları ile sıkıştırma yapabilmek ve bu işlemi karmaşık tasarımlar kullanmadan gerçekleştirebilmektir. H.264/AVC teknolojisi sayısal televizyon yayıncılığı başta olmak üzere DVD depolama, RTP/IP paket ağları, düşük veya yüksek çözünürlük içeren geniş ağlar ve sistemler olmak üzere çok geniş bir alanda çalışabilmektedir.

H.264/AVC'nin kendisinden önce geliştirilen teknolojilerle (H.261, MPEG-1, MPEG-2, H.263, MPEG-4) kullanmış olduğu benzer parametreler aşağıda sıralanmaktadır.

- Zamansal ve uzamsal benzerliği kullanan hareket tamamlamalı tahmin (motion compensation prediction)
- Uzamsal bağımlılığı kullanan dönüşüm (transform for reduction of spatial correlation)
- Veri yoğunluğunu (bit-rate) yönetmek için kullanılan niceleme
- İstatistiksel bağımlılığı kullanan entropi kodlama

H.264/AVC'nin kendisinden önce geliştirilen teknolojilere göre daha verimli sıkıştırma yapabilmesini sağlayan parametreler ise aşağıda yer almaktadır.[80]

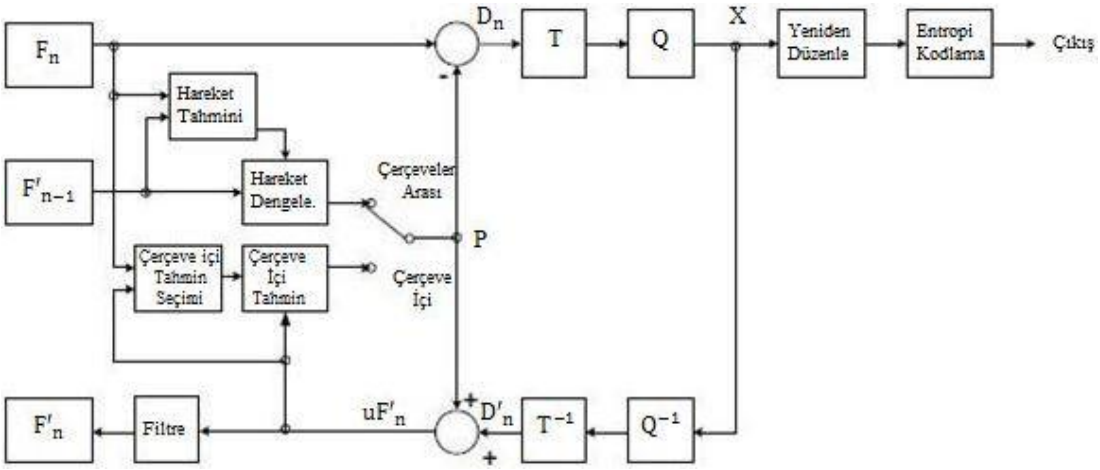
- Değişken blok büyüklüklü hareket dengeleme: Önceki teknolojilerde hareket dengeleme için kullanılan blok büyüklükleri sabitken H.264/AVC farklı blok büyüklüklerini desteklemektedir.

[80] Iain E.G. Richardson, *An Introduction to H.264 Advanced Video Coding,* The Vcodex Technical, 2010, s.7-34.

- Parlaklık bileşenini 1/2 piksel doğruluğunda, renklilik bileşenini ise 1/8 piksel doğruluğunda tahmin edebilmektedir.
- Hareket dengelemesini 15 farklı referans çerçeve kullanarak gerçekleştirmektedir.
- Küçük blok büyüklüklü dönüşüm: Önceki teknolojilerde dönüşüm için kullanılan blok büyüklüğü 8×8 iken H.264/AVC 4×4 blok büyüklüğüne kadar destek vermektedir.
- Aritmetik Entropi Kodlayıcı (CABAC)
- Konteks Uyumlu Entropi Kodlayıcı (CAVLC)

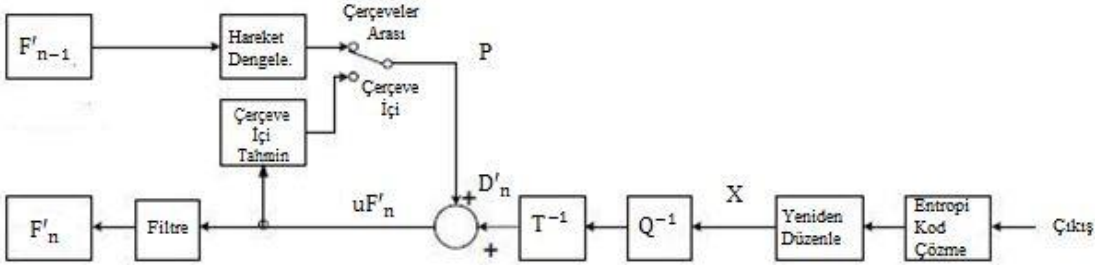
2.4.2.1. Genel Kodlama ve Kod Çözme Yapısı

H.264/AVC, bütün video sıkıştırma teknolojilerinde olduğu gibi video sıkıştırma işlemini kodlama (encode) ve kod çözme (decode) olmak üzere iki aşamada gerçekleştirmektedir. Şekil 2.29'da kodlama ve Şekil 2.30'da ise kod çözme aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.29 H.264/AVC teknolojisinin kodlama aşamaları [81]

[81] Iain E.G. Richardson, 2003, s.160.



Şekil 2.30 H.264/AVC teknolojisinin kod çözme aşamaları [82]

H.264/AVC teknolojisinin kodlama aşamalarını incelenecek olursa, F_n giriş çerçevesi ilk olarak makro bloklara ayrılır. Her bir makro blok çerçeve içi veya çerçeveler arası tahmin yöntemi kullanılarak kodlanır. Tahmin edilecek çerçeve için kendisinden önce veya sonra gelen çerçeveler referans alınır. F'_{n-1} olarak adlandırılan referans çerçevesi daha önceden kodlanmış, yeniden oluşturulmuş ve süzgeçlenmiş bir yapıda olmalıdır. Artıklık bloğu olan D_n değerini bulmak için tahmin bloğu ile kodlanacak bloğun farkı alınır. Kodlama aşamasında bulunması gereken en önemli parametre artıklık değeri olup söz konusu değer bulunduktan sonra uygun dönüşüm yöntemi ile frekans düzlemine geçilir. Dönüşümden sonra elde edilen değerler görüntü sıkıştırma teknolojilerinde olduğu gibi niceleme adımından geçirilir. Nicelenen dönüşüm katsayıları yeniden düzenlenir ve kayıpsız sıkıştırma sağlayan entropi kodlama işleminden geçirilir. Video kodlamada asıl sıkıştırma verimliliğini oluşturan adım çerçeveler arası kodlamadır. Çerçeveler arası kodlamanın gerçekleştirilebilmesi için her bir çerçeveye ait makro blokların çözümlenmesi gerekmektedir. Kodlanmış H.264/AVC video katarını çözebilmek için bu işlemlerin tersi olan ve Şekil 2.30'da gösterilen adımlar uygulanır.[83]

[82] a.g.e., s.161.
[83] Orhan Akbulut, *Bir-Bit Dönüşümü Temelli Blok Hareket Kestirimlerinin H.264/AVC'ye Uygulanması*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 2007, s.13.

2.4.2.2. Çerçeve, Dilim, Makro Blok ve Alt Makro Blok Yapısı

H.264/AVC, sıkıştırma öncesi video katarını çerçevelere ayırmaktadır. Her bir çerçeve dilimlerden, dilimlerde makro bloklardan oluşmaktadır. Bir makro blok 16×16 büyüklüğünde parlaklık bileşeni (Y) ve 8×8 büyüklüklerinde renklilik bileşenlerinden (Cb, Cr) oluşmaktadır. Bu durum 4:2:0 formatının seçildiği durumlarda geçerli olup 4:2:2 veya 4:4:4 formatı tercih edildiği durumlarda parlaklık ve renk bileşenlerinin oranı değişmektedir. Her makro blok, ayrıca alt makro bloklara ayrılır. H.264/AVC teknolojisi 16×16, 16×8, 8×16, 8×8, 8×4, 4×8, 4×4 olmak üzere 7 farklı alt makro blok ayrımını desteklemektedir. Alt makro bloklar bloklara, bloklarda piksellere ayrılmaktadır. H.264/AVC teknolojisinin bölümlendirme bileşenleri sırasıyla çerçeve, dilim, makro blok, alt makro blok, blok ve piksel olarak sıralanabilir.

Dilimler, en az bir en fazla kendisini oluşturabilecek maksimum makro blok aracılığıyla bölümlendirilir. Her dilim için makro blok sayısı aynı olmak zorunda değildir. Dolayısıyla dilimler arasındaki bağımlılık en alt düzeydedir. Bu durum, kodlama sırasında oluşacak hata dayanıklılığını artırmaktadır.

H.264/AVC teknolojisinde I, B, P, SI ve SP olmak üzere 5 farklı dilim tipi bulunmaktadır. I, B ve P dilimleri kendisinden önce geliştirilen teknolojilerde de var olup SI (Switching I) ve SP (Switching P) dilimleri H.264/AVC ile gelen bir yeniliktir. SI ve SP dilimler, çerçeve içi ve çerçeveler arası kodlama işlemlerinin hata dayanıklılığını artırmak için geliştirilmiştir. Dilim tiplerine ait özellikler Tablo 2.9'da gösterilmektedir.[84]

[84] A. Hüseyin Erşahin, *H.264/AVC ile Düşük Gecikmeli Sıkıştırma*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2009, s.10.

Tablo 2.9 H.264/AVC teknolojisi dilim tipleri

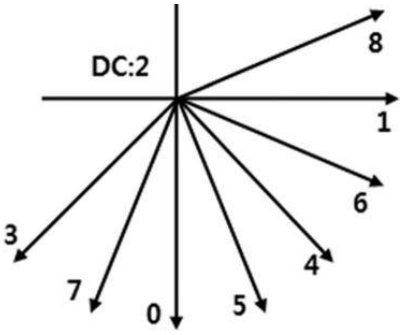
Dilim Tipi	Özelliği
I (Çerçeve İçi)	Sadece I makro bloklardan oluşur ve her bir makro blok aynı dilim içerisinde daha önceden kodlanmış piksellerden tahmin yapılarak elde edilir.
P (Çerçeveler Arası)	P tipi makro bloklardan oluşur ve makro bloklar ya da makro blokları oluşturan alt makro bloklar önceden kodlanmış çerçeveler ya da I makro bloklara referans verilerek tahmin edilir.
B (İki Yönlü Tahmin)	B tipi makro bloklardan oluşur ve makro bloklar ya da makro blokları oluşturan alt makro bloklar önceden veya sonradan kodlanmış çerçevelere ya da I makro bloklara referans verilerek tahmin edilir.
SI (Swithching I)	Kodlanmış bit akışları arasında geçiş yapabilmeyi sağlar. Sadece P veya I makro blokları içerir.
SP (Swithching P)	Kodlanmış bit akışları arasında geçiş yapabilmeyi sağlar. Sadece SI makro blokları içerir.

2.4.2.3. Çerçeve İçi Tahmin Yöntemi

H.264/AVC'den önce geliştirilen teknolojilerde çerçeve içi tahmin yapılırken I dilimleri görüntü sıkıştırma teknolojilerinde olduğu gibi dönüştürme, niceleme ve kodlama aşamalarından geçmektedir. Ancak H.264/AVC, çerçeve içi tahmin yaparken uzamsal benzerliği de kullanmakta ve Intra 4×4, Intra 8×8, Intra 16×16 ve I-PCM olmak üzere 4 farklı kodlama biçimini desteklemektedir. Sıralanan 4 farklı yöntem görüntüyü oluşturan parlaklık bileşeni için uygulanmakta olup renklilik bileşeni için de ayrıca Intra 8×8 kodlama biçimi geliştirilmiştir. Görüntü verisinin karmaşık bölümlerine Intra 4×4, sade bölümlerine Intra 16×16 uygulanmaktadır. Intra 16×16 kodlama ile 256 piksel, Intra 8×8 kodlama ile 64 piksel ve Intra 4×4 kodlama ile 16 piksel tahmin edilmektedir. I-PCM ise herhangi bir tahmin işleminin yapılmadığı durumdur ve en ufak veri kaybının istenmediği profesyonel uygulamalarda kullanılmaktadır.

2.4.2.3.1. Intra 4×4 Kodlama (Parlaklık Bileşeni)

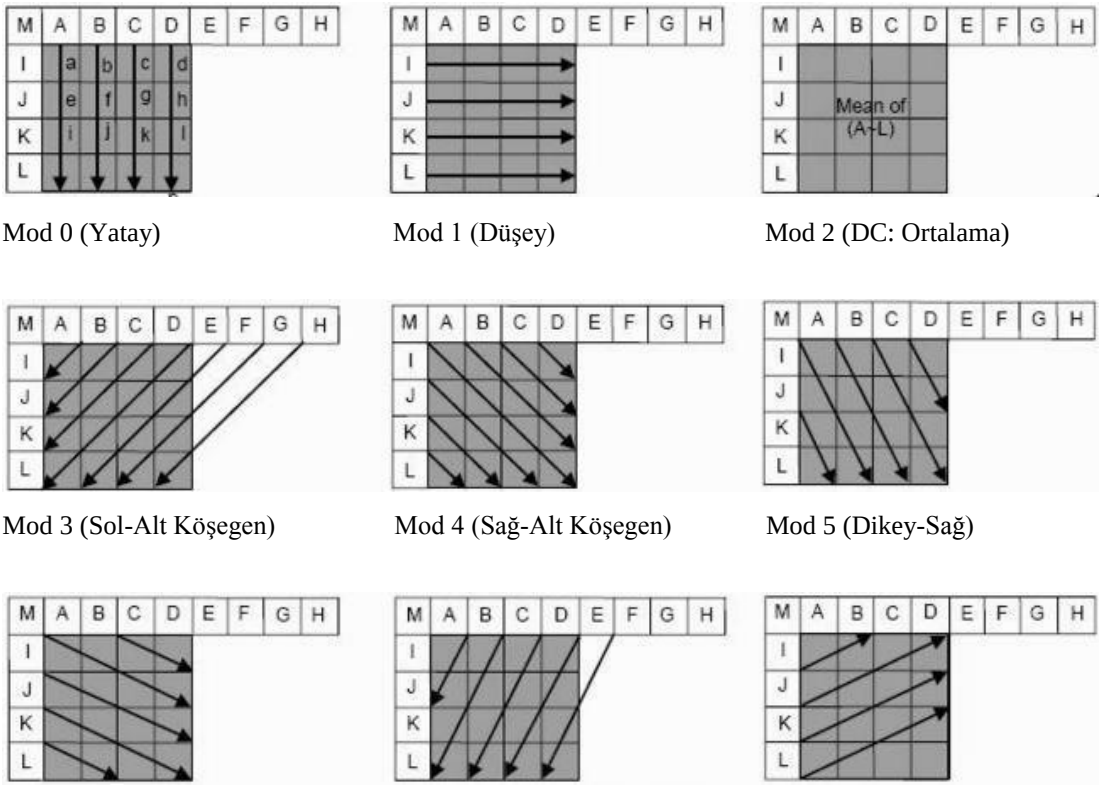
Intra 4×4 kodlama, görüntülerin yüksek seviyede detay içerdiği bölümlere uygulanmakta ve 4×4 büyüklüğünde bloğun parlaklık değerini komşu bloklar aracılığıyla tahmin edebilmek için 9 farklı tahmin modu kullanmaktadır. İlgili modlar ve özellikleri Şekil 2.31 ve 2.32'de gösterilmektedir.



Şekil 2.31 Intra 4×4 kodlama tahmin yönleri

- **Mod 0 (Dikey):** Tahmin için 4×4 büyüklüğündeki bloğun üzerinde yer alan A, B, C, D piksel değerleri kullanılır.
- **Mod 1 (Yatay):** Tahmin için 4×4 büyüklüğündeki bloğun solunda yer alan I, J, K, L piksel değerleri kullanılır.
- **Mod 2 (DC: Ortalama):** Tahmin için 4×4 büyüklüğünde bloğun üzerinde yer alan A, B, C, D ve solunda yer alan I, J, K, L piksel değerlerinin ortalaması alınır ve bloğun her pikseline bu değer referans olarak atanır.
- **Mod 3 (Sol - Alt Köşegen):** Tahmin için yukarı sağdan aşağı sola doğru 45 derece açı ile tarama yapılır.
- **Mod 4 (Sağ - Alt Köşegen):** Tahmin için yukarı soldan aşağı sağa doğru 45 derece açı ile tarama yapılır.
- **Mod 5 (Dikey-Sağ):** Tahmin için dikeyin sağına doğru 24.6 derecelik açı ile tarama yapılır.
- **Mod 6 (Yatay-Sağ):** Tahmin için yatayın sağına doğru 24.6 derecelik açı ile tarama yapılır.

- **Mod 7 (Dikey-Sol):** Tahmin için dikeyin soluna doğru 26,6 derecelik açı ile tarama yapılır.
- **Mod 8 (Yatay-Sol):** Tahmin için yatayın soluna doğru 26,6 derecelik açı ile tarama yapılır.



Mod 0 (Yatay) Mod 1 (Düşey) Mod 2 (DC: Ortalama)

Mod 3 (Sol-Alt Köşegen) Mod 4 (Sağ-Alt Köşegen) Mod 5 (Dikey-Sağ)

Mod 6 (Yatay-Sağ) Mod 7 (Dikey-Sol) Mod 8 (Yatay-Sol)

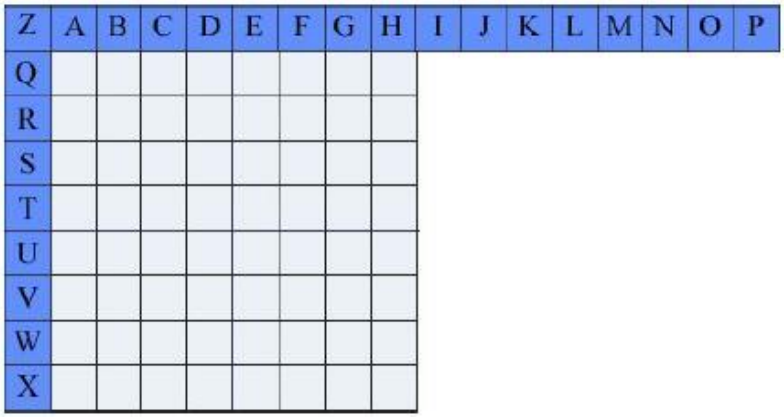
Şekil 2.32 Intra 4×4 kodlama tahmin modları [85]

2.4.2.3.2. Intra 8×8 Kodlama (Parlaklık Bileşeni)

Intra 8×8 kodlama, görüntülerin orta seviyede detay içerdiği bölümlere uygulanmakta ve 8×8 büyüklüğünde bloğun parlaklık değerini komşu bloklar aracılığıyla tahmin edebilmek için Intra 4×4 kodlamada kullanılan 9 farklı mod kullanmaktadır. Orta seviyede detay içeren bölümlere Intra 4×4 kodlama uygulanırsa sıkıştırma süresi uzamakta ve verimlilik azalmaktadır. Intra 4×4 kodlamada tahmin

[85] Jani Lainema ve Kemal Ugur, *Angular Intra Prediction in High Efficiency Video Coding (HEVC)*, IEEE 13th International Workshop: Multimedia Signal Processing (MMSP), 2011, s.2.

için kullanılan komşu piksel sayısı 13 iken, Intra 8×8 kodlamada 25'tir. Intra 8×8 kodlama, Şekil 2.33'te gösterilmektedir. Şekil 2.33'te görüldüğü gibi komşu pikseller A…X'e kadardır ve 25 tanedir.



Şekil 2.33 Intra 8×8 kodlama (Parlaklık bileşeni)

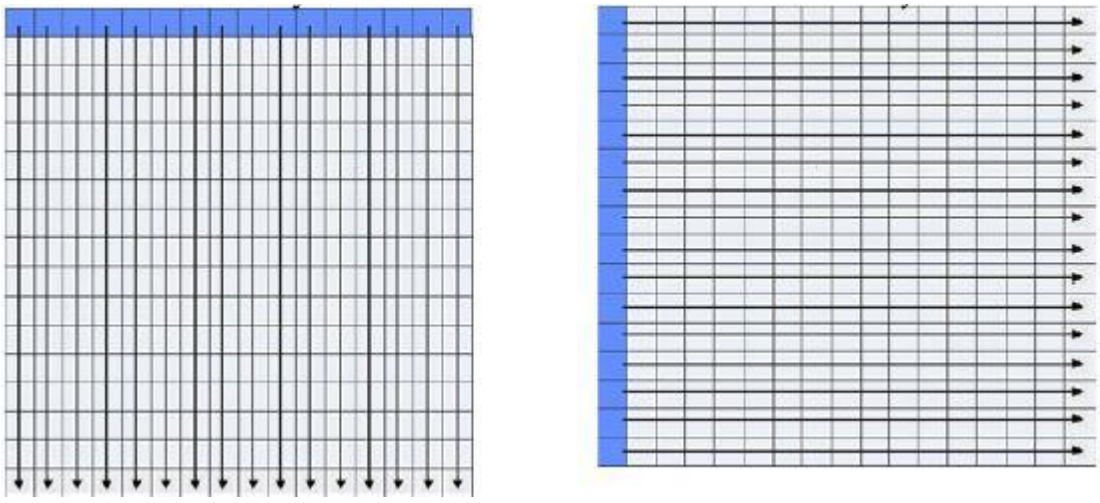
2.4.2.3.3. Intra 16×16 Kodlama (Parlaklık Bileşeni)

Intra 16×16 kodlama, görüntülerin düşük seviyede detay içerdiği bölümlere uygulanmakta ve 16×16 büyüklüğünde bloğun parlaklık değerini komşu bloklar aracılığıyla tahmin edebilmek için Mod 0, Mod 1, Mod2 ve Mod 3 olmak üzere 4 farklı mod kullanılmaktadır. Tek seferde en fazla (256) piksel tahminini gerçekleştirdiği için en düşük maliyetli ve en hızlı kodlama türüdür. Yaygın olarak kullanılan Mod 0 ve Mod 1 Şekil 2.34'te gösterilmektedir.[86]

- **Mod 0 (Dikey):** Tahmin için 16×16 büyüklüğündeki bloğun üzerinde yer alan komşu 16 pikselin değerleri kullanılır.
- **Mod 1 (Yatay):** Tahmin için 16×16 büyüklüğündeki bloğun solunda yer alan komşu 16 pikselin değerleri kullanılır.
- **Mod 2 (DC: Ortalama):** Tahmin için 16×16 büyüklüğünde bloğun üzerinde yer alan 16 pikselin ve solunda yer alan 16 pikselin değerlerinin ortalaması alınır ve bloğun her pikseline bu değer referans olarak atanır.

[86] S. Nagori ve A. Jain, s.57.

- **Mod 3 (Düzlem):** Yüzeysel kestirim modu olarak da bilinmektedir. Sol ve yukarı alanlardaki örneklere (H+V) doğrusal düzlem fonksiyonu uygulanır. Parlaklığın yavaş değiştiği alanlarda etkilidir.



Mod 0 (Dikey) Mod 1 (Yatay)

Şekil 2.34 Intra 16×16 kodlama (Parlaklık bileşeni)

2.4.2.3.4. Intra 8×8 Kodlama (Renklilik Bileşeni)

Intra 8×8 kodlama, renklilik tahmini için Intra 16×16 parlaklık kodlamasında olduğu gibi Mod0, Mod1, Mod2 ve Mod3 olmak üzere 4 farklı mod kullanılmaktadır. Aralarındaki tek farklılık, Intra 8×8 renklilik kodlamasındaki Mod 0'ın Intra 16×16 kodlamasındaki Mod 2 gibi, Mod 2'nin ise Intra 16×16 kodlamasındaki Mod 0 gibi çalışmasıdır.

İnsan gözü parlaklık bileşenine renklilik bileşeninden daha fazla duyarlı olduğu için H264/AVC teknolojisi, renklilik bileşenine oranla parlaklık bileşenine daha fazla sayıda kodlama biçimi ve alt modlar tanımlamıştır.

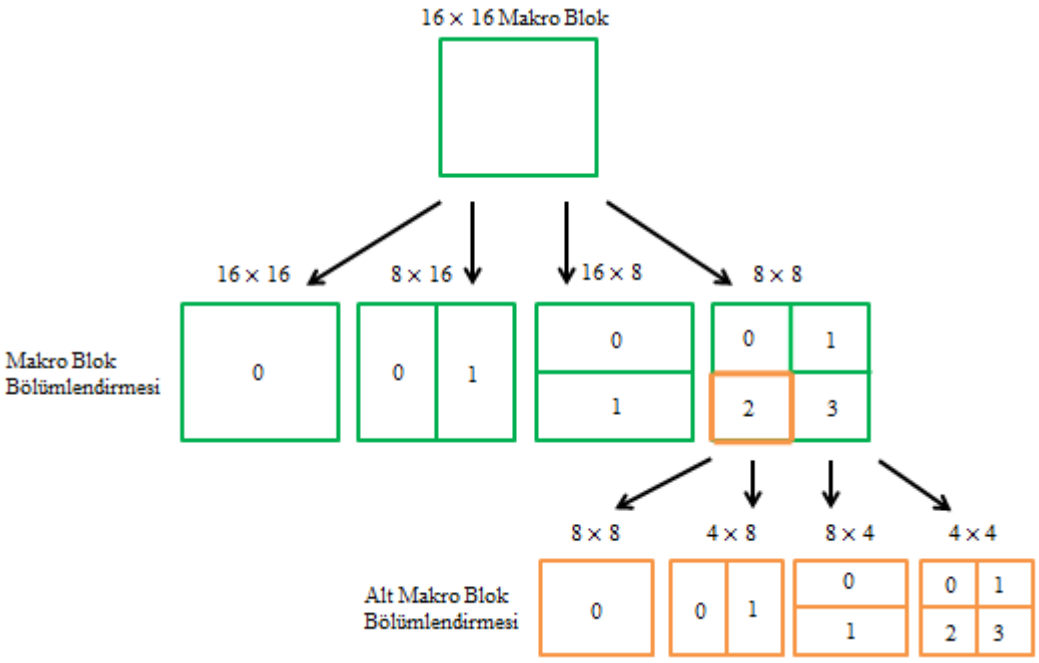
2.4.2.4. Çerçeveler Arası Tahmin Yöntemi

H.264/AVC, çerçeveler arası tahmini Bölüm 2.4.1'de anlatılan P ve B çerçevelerini kullanarak gerçekleştirmektedir. Kendisinden önce geliştirilen

teknolojilerden farklı olarak H.264/AVC, çerçeveler arası tahmini daha basit bir algoritma ile gerçekleştirmektedir. Çerçeveler arası tahmin yönteminde çerçeve içi tahmininde kullanılan uzamsal benzerliğin aksine zamansal benzerlik de kullanılmaktadır.

2.4.2.4.1. P Dilim Yöntemi

P dilimleri aracılığıyla gerçekleştirilen tahminde çok çeşitli büyüklüklerde makro bloklar kullanılmaktadır. H.264/AVC teknolojisi 16×16, 16×8, 8 ×16, 8×8, 8×4, 4×8 ve 4×4 büyüklüğünde olmak üzere 7 farklı makro blok yapısını desteklemektedir. İlgili makro blokların haricinde alt makro bloklar da tanımlamıştır. Alt makro bloklar ise 8×8, 8×4, 4×8 ve 4×4 büyüklüğünde olmak üzere 4 adettir. Ancak bu noktadaki önemli husus sadece 8×8 büyüklüğündeki makro blok, alt makro blok bölünmesine izin vermektedir.[87] İlgili makro blok yapısı Şekil 2.35'te gösterilmektedir.



Şekil 2.35 H.264/AVC'nin çerçeveler arası tahminde kullandığı makro bloklar

[87] Elemental Technologies, *A Primer on the H.265 Video Codec*, Elemental White Paper, 2013, s.9.

Çerçeveler arası tahminde seçilen makro blok ve alt makro bloğun büyüklüğü sıkıştırma verimliliğini etkilemektedir. Büyük boyutlu makro blokların seçilmesi halinde hareket vektörleri ve blok boyutunun tipi için kullanılacak bit miktarı azalmakta ancak artıklık (fark) bloğu için kullanılacak dönüşüm kat sayılarını kodlamak için çok fazla bit gerekmektedir. Diğer taraftan, küçük boyutlu makro blokların seçilmesi halinde artıklık (fark) bilgisini kodlamak için gerekli olan bit miktarı azalmakta ancak blok sayısının fazlalaşması, hareket vektörü ve blok tipleri için kullanılan bit miktarının artmasına neden olmaktadır.

2.4.2.4.2. B Dilim Yöntemi

B dilimlerini kullanarak gerçekleştirilen tahmin yönteminde kullanılan makro blok ve alt makro blok büyüklükleri P dilimlerini kullanarak gerçekleştirilen tahmin yöntemiyle aynıdır. Ancak B dilimler ile gerçekleştirilen tahmin, Bölüm 2.4.1'de de anlatıldığı gibi anlık çerçevenin öncesindeki çerçeve referans alınamadığı durumda anlık çerçeveden sonraki çerçevenin referans alınmasıyla gerçekleştirilmektedir. P çerçevesinin kullanılması durumunda sadece anlık çerçevenin öncesindeki çerçeveler referans alınabilir.

2.4.2.5. Dönüşüm, Niceleme ve Entropi Kodlama İşlemleri

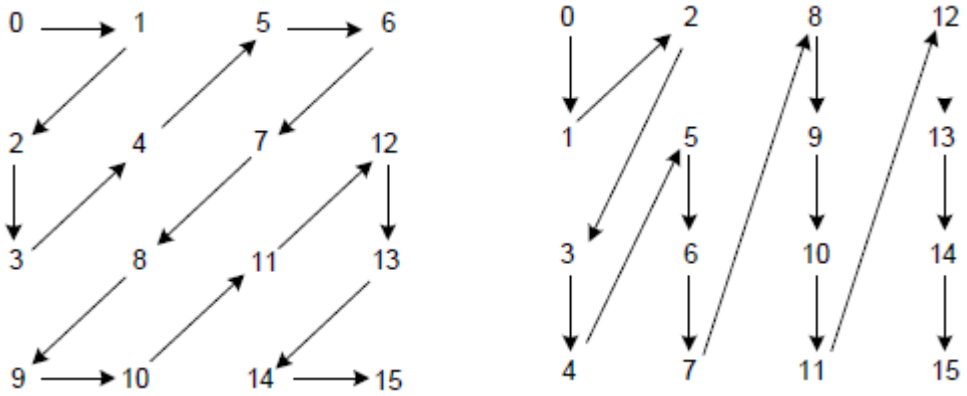
H.264/AVC teknolojisinde çerçeveler makro bloklara ayrılarak gerekli tahmin işlemleri yapılır ve fark verileri her makro blok için ayrı ayrı elde edilir. Fark verileri elde edildikten sonra frekans bölgesine geçerek niceleme ve entropi kodlama adımlarının hızlı yapılabilmesi için dönüşüm işlemi gerçekleştirilir. H.264/AVC, 8×8 büyüklüğünde DCT dönüşümü yerine tam sayı dönüşümü kullanmaktadır. Dönüştürme işleminde kullanılan blokların büyüklüğü genellikle 4×4, bazı özel durumlar için 2×2'dir. Dönüştürme işleminde, daha küçük blokların kullanılması özellikle video karesinin karmaşıklığının arttığı alanlarda veri kaybını önlemektedir. Ayrıca, dönüşümün tam sayı tabanlı olması kodlama ve kod çözme aşamalarının

hızlı ve kayıpsız gerçekleşmesini sağlamaktadır. Tam sayı dönüşümü için Şekil 2.36'da gösterildiği gibi 3 farklı yöntem kullanılmaktadır. H_1(Hadamard) matrisi, çerçeve içi veya çerçeveler arası tahmin bloklarının hangisinin seçildiğine bağlı olmaksızın tüm parlaklık ve renklilik bileşenlerine uygulanır. Eğer 16×16 büyüklüğünde makro bloklar seçilerek çerçeve içi tahmin yapıldıysa H_2 (Hadamard) matrisi uygulanır. (16×16 büyüklüğünde makro blok, 4 tane 4×4 büyüklüğünde bloktan oluştuğu için H_2 matrisi kullanılmaktadır.) H_3 (Hadamard) matrisi ise 2×2 büyüklüğünde dönüşümün tercih edildiği durumlarda kullanılmaktadır.[88]

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad H_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Şekil 2.36 Tam sayı dönüşümde kullanılan hadamard matrisleri

H.264/AVC teknolojisi, sayısal niceleme yöntemini kullanılmaktadır. Niceleme işleminde, giriş sinyal değerleri çerçeve veya alan tarama sırası ile belirlenmiş değerlere yuvarlanmaktadır. Niceleme parametresi olan QP (Quantization Parameter), 52 farklı değer alabilmektedir. Çerçeve veya alan tarama sırası Şekil 2.37'de gösterilmektedir.[89]



Çerçeve Modu **Alan Modu**

Şekil 2.37 H.264/AVC teknolojisi niceleme işlemi

[88] Gary J. Sullivan, Pankaj Topiwala ve Ajay Luthra, *The H.264/AVC Advanced Video Coding Standard: Overview and Introduction to the Fidelity Range Extensions*, The SPIE 49th Annual Meeting: SPIE Conference on Applications of Digital Image Processing XXVII, 2004, s.8-9.
[89] a.g.k., s.9.

Sıkıştırma işleminin son adımı olan entropi kodlamada, karakterlerin kullanım sıklığına göre kod ataması yapılır. Entropi kodlama kayıpsız sıkıştırma işlemidir. H.264/AVC, CAVLC ve CABAC olmak üzere iki farklı entropi kodlama yöntemi kullanmaktadır.

CAVLC yönteminde dönüşüm katsayıları, önceki söz-dizim elemanlarının değerlerine göre değiştirilen (uyarlanabilir) değişken uzunluklu kod (VLC: Variable Length Code) tablosu kullanılarak belirlenir. CAVLC, Huffman kodlama temel alınarak geliştirilmiştir. CABAC yöntemi ise çarpma işlemi içermeyen yöntemlerle kodlama yaptığından karmaşıklığı daha düşüktür. Bundan dolayı CABAC yöntemi, CAVLC yöntemine oranla %10-15 arasında daha fazla sıkıştırma kazancı sağlamaktadır.

2.4.2.6. Profil ve Seviyeler

H.264/AVC, çok çeşitli uygulama alanlarında kullanım olanağına sahiptir. Her uygulama için farklı bit hızı, çözünürlük, hata kontrolü, kalite gerektiği için karmaşıklığı azaltmak amacıyla çeşitli profil ve seviyeler tanımlanmıştır. İlgili profillere ait özellikler aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.[90]

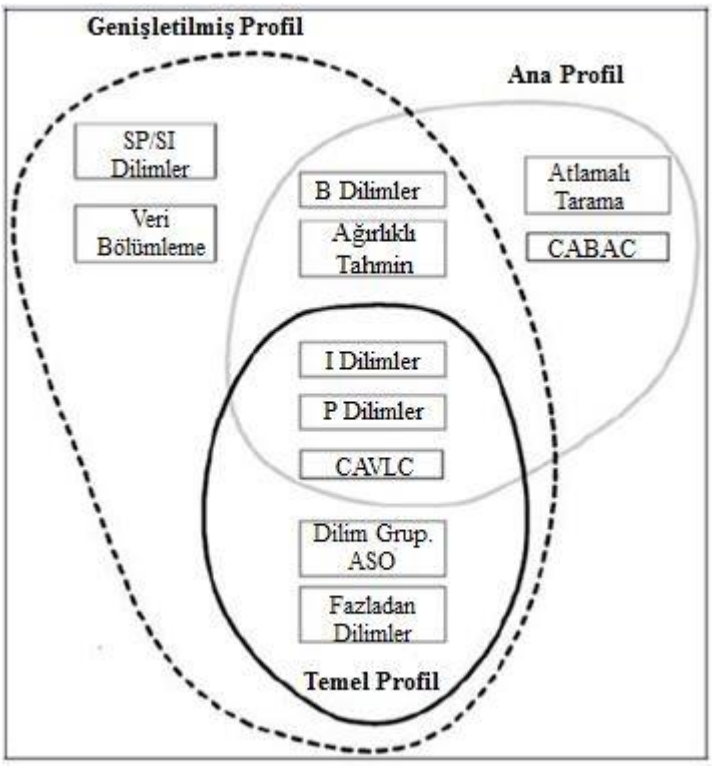
- Temel Profil (Baseline Profile): Çerçeve içi ve çerçeveler arası tahminin yanı sıra CAVLC yöntemini desteklemektedir. Video konferans ve kablosuz haberleşme gibi uygulamalarda kullanılmakta olup genellikle taşınabilir (mobil) cihazlarda tercih edilmektedir. Kaynağın kısıtlı olduğu uygulamalarda kullanılabilmesi amacıyla karmaşık özelliklerden yoksun olarak tasarlanmıştır.

[90] Güneş Arı, *H.264 Videolarının İletiminde Hata Kurtarımı*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 2011, s.14.

- Ana Profil (Main Profile): Çerçeveler arası tahminde B dilimlerini kullanmakta ve CABAC yöntemini desteklemektedir. Sayısal televizyon yayıncılığında ve video depolama uygulamalarında kullanılmaktadır.

- Genişletilmiş Profil (Extended Profile): İletim ortamlarında kaybı minimuma indirmek için veri bölümlendirme özelliğine sahiptir. Çoklu ortam uygulamalarında kullanılmakta olup CABAC dışında tüm kodlama özelliklerine sahiptir. SP/SI dilimler sadece gelişmiş profilde yer almaktadır.

H.264/AVC teknolojisine ait profiller ve sahip oldukları özellikler Şekil 2.38'de gösterilmektedir.[91]



Şekil 2.38 H.264/AVC teknolojisi profilleri

Yukarıda aktarılan profillerin dışında ayrıca tanımlanan Yüksek Profil (High Profile); High, High 10, High 4:2:2, High 4:4:4 olmak üzere 4 farklı seviyeye sahiptir. Yüksek profilin altında tanımlanan seviyeler içerik zenginleştirme, stüdyo

[91] a.g.t., s.17.

gibi profesyonel uygulamaların yanı sıra sayısal televizyon yayıncılığında da kullanılmaktadır.[92]

- **High Profil:** 4:2:0 örneklemeli ve 8 bit derinliğinde video uygulamalarını desteklemektedir.
- **High 10 Profil:** 4:2:0 örneklemeli ve 10 bit derinliğinde video uygulamalarını desteklemektedir.
- **High 4:2:2 Profil:** 4:2:2 örneklemeli ve 10 bit derinliğinde video uygulamalarını desteklemektedir.
- **High 4:4:4 Profil:** 4:2:4 örneklemeli ve 12 bit derinliğinde video uygulamalarını desteklemektedir.

2.4.3. H.265/HEVC (High Efficiency Video Coding)

H.265/HEVC, ITU-T'ye bağlı VCEG ve ISO/IEC'ye bağlı MPEG gruplarının bir araya gelmesiyle oluşturulan JVT grubu tarafından 2013 yılında geliştirilmiş ve standart haline getirilmiştir.

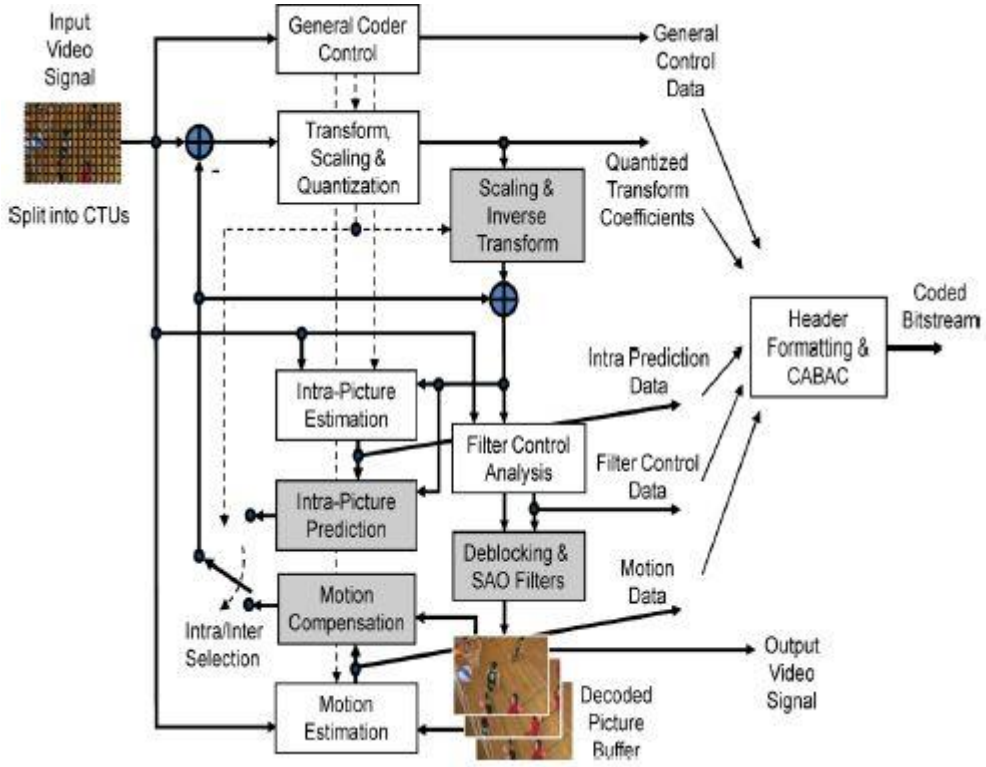
H.265/HEVC, H.264/AVC teknolojisine göre daha yüksek video kalitesi ve sıkıştırma verimliliği sağlamak için geliştirilmiştir. H.265/HEVC, sahip olduğu yüksek verimliliği tüm modern sıkıştırma teknolojilerinin ana gövdesini oluşturan blok tabanlı hareket dengeleme yöntemine ek özellikler katarak gerçekleştirmektedir. Söz konusu ek özellikler aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- Daha esnek bölümlendirme imkânı sunmaktadır.
- Daha fazla tahmin modu ve yönü kullanmaktadır.
- Daha gelişmiş hareket dengeleme tekniğine sahiptir.
- Dönüşüm için daha fazla ve farklı büyüklüklerde bloklar kullanmaktadır.
- ALF (Adaptive Loop Filter) ve SAO (Sample Adaptive Offset) filtrelerine sahiptir.

[92] a.g.t., s.17.

2.4.3.1. Genel Kodlama ve Kod Çözme Yapısı

H.265/HEVC teknolojisi bölümlendirme (Split into CTUs), tahmin (Intra and Inter Prediction), dönüşüm (Transform), niceleme (Quantization) ve entropi kodlama (CABAC) adımlarıyla sıkıştırma işlemini gerçekleştirmektedir. Bu adımların yanı sıra Sample Adaptive Offset (SAO) özelliğini de sunmaktadır. H.265/HEVC teknolojisine ait sıkıştırma adımları Şekil 2.39'da gösterilmektedir.



Şekil 2.39 H.265/HEVC teknolojisinin video sıkıştırma adımları [93]

2.4.3.2. CTU, CU, PU, TU Birimlerinin Yapısı

H.265/HEVC'den önce geliştirilen teknolojiler bölümlendirme işlemini çerçeve, dilim, makro blok, alt makro blok ve bloklar aracılığıyla H.265/HEVC ise

[93] Gary J. Sullivan, Jens-Rainer Ohm, Woo-Jin Han ve Thomas Wiegand, "Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard", *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, Cilt:22, Sayı:12, 2012, s.1651.

CTU (Coding Tree Unit), CU (Coding Unit), PU (Prediction Unit) ve TU (Transform Unit) birimleri aracılığıyla gerçekleştirmektedir.[94] Görüntü çerçevesinin bölümlendirilmesiyle elde edilen bloklar, H.265/HEVC teknolojisinde birim olarak adlandırılmaktadır. Her bir birimi ifade etmek için parlaklık ve renklilik bileşenleri kullanılmaktadır. Bölümlendirme işlemi, çatı ve alt dallardan oluştuğu için ağaç bölümlendirmesi adını almaktadır. Ağacın çatısını CTU; dallarını CU, PU ve TU birimleri oluşturmaktadır.

2.4.3.2.1. CTU ve CTB Birimleri

H.265/HEVC, sıkıştırma adımının başında videoyu oluşturan her bir görüntü çerçevesini dilimlere ayırmakta ve bu dilimlerde tam sayı katı olmak üzere CTU birimlerinden oluşmaktadır. Her bir CTU, parlaklık bileşenini oluşturan bir adet CTB (Coding Tree Block) ve renklilik bileşenini oluşturan iki adet CTB biriminden oluşmaktadır. CTU birimleri 8×8, 16×16, 32×32 ve 64×64 büyüklüğünde olmak üzere 4 farklı şekilde tanımlanmaktadır. CTU birimlerinin tahmini için çerçeve içi, çerçeveler arası ve skipped (atlama) yöntemleri kullanılmaktadır.[95] Video sıkıştırmanın ilk adımı ve ağaç yapısının çatısını oluşturan CTU için sağlamış olduğu esneklik H.265/HEVC teknolojisinin sıkıştırma verimliliğini artıran etkenlerin başında gelmektedir.

2.4.3.2.2. CU ve CB Birimleri

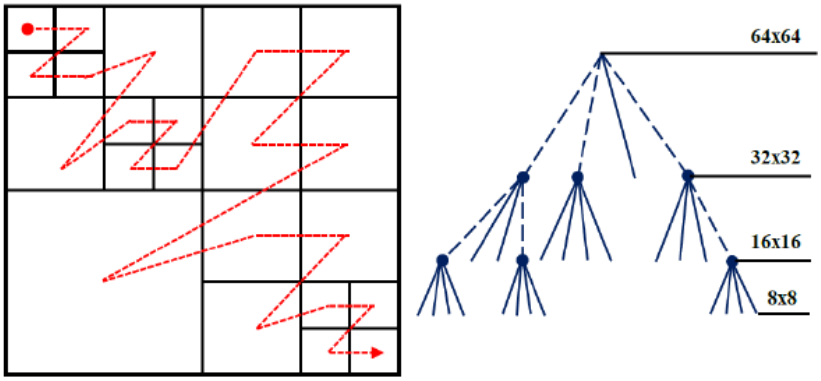
Kodlama ağacı yapısı gereği CTU birimleri, farklı büyüklüklerde CU birimlerine bölünebilmektedir. CU birimleri de CTU gibi parlaklık bileşenini oluşturan bir adet CB (Coding Block) ve renklilik bileşenini oluşturan iki adet CB biriminden oluşmaktadır. CU, kodlama ağacı yapısı gereği CTU birimlerinin yaprağı

[94] J. Lainema ve K. Ugur, 2011.'den aktaran Manohar Kuse, *Intra Coding in HEVC*, 2014, s.9-15. https://kusemanohar.files.wordpress.com/2014/04/hevc-intra-coding-mtrec-group-meeting.pdf (13.09.2015)
[95] G. J. Sullivan, J.R. Ohm, W.J. Han ve T. Wiegand, 2012, s.1651.

olarak adlandırılmaktadır. CU birimleri de tahmin için çerçeve içi, çerçeveler arası ve skipped yöntemleri kullanılmaktadır. CU birimleri 8×8, 16×16, 32×32 ve 64×64 büyüklüğünde olmak üzere 4 farklı şekilde tanımlanmaktadır.[96] CU büyüklüğü 64×64 olduğunda CTU biriminin tamamını kapsamaktadır. Dolayısıyla, CTU bölümlendirme bir tane CU aracılığı ile gerçekleştirilmektedir.

Detaylı görünmesi istenen CTU birimleri fazla sayıda CU ile detaylı gözükmesi istenmeyen CTU birimleri ise az sayıda CU ile tanımlanmaktadır. Detaylı gözükmesi istenen alanlar CU biriminin minimum büyüklüğüne ulaşıncaya kadar bölümlendirilir.

Şekil 2.40'da 64×64 büyüklüğünde CTU ve ilgili CTU biriminin 22 tane CU birimine bölünmesi sonucu elde edilen durum gösterilmektedir.[97]



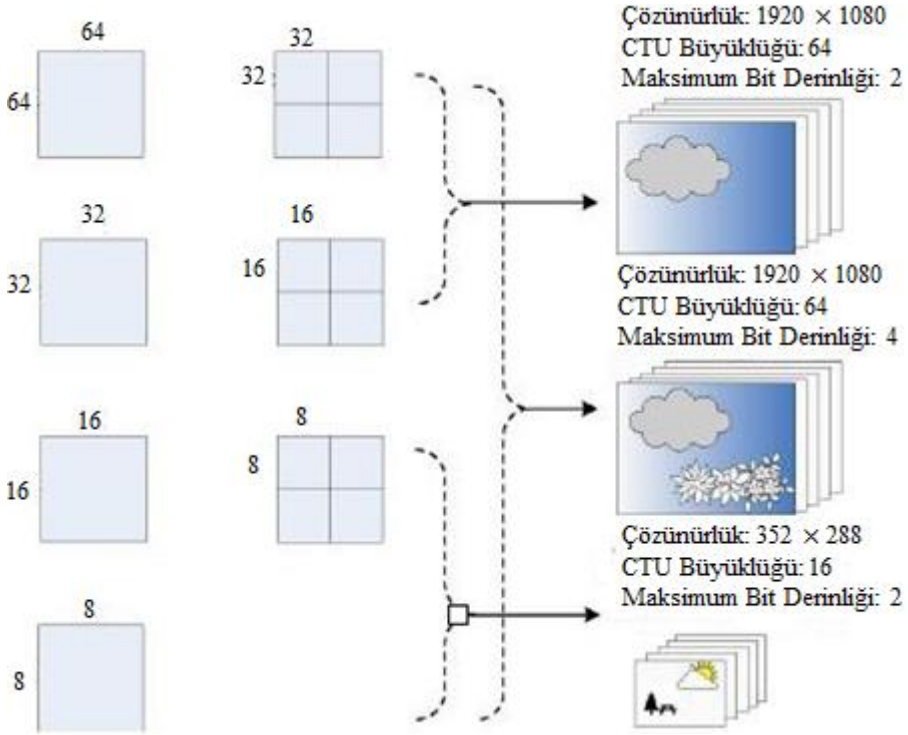
CTU Bölümlendirmesi **Kodlama Ağacı Yapısı**

Şekil 2.40 CTU bölümlendirmesi ve kodlama ağacı yapısı

H.264/AVC, sabit makro blok yapısını desteklemektedir. Ancak H.265/HEVC, CTU ve CU bölümlendirmesi için çok çeşitli büyüklükleri desteklemekte ve bu durum sıkıştırma verimliliğini artırmaktadır. H.265/HEVC, derinliğin fazla olduğu alanlarda 8×8 büyüklüğünde CU kullanırken derinliğin az olduğu alanlarda 64×64 büyüklüğünde CU kullanmaktadır. Derinlik oranının 2

[96] a.g.m., s.1651.
[97] Abdülkerim Öztekin, *Fast Encoder Implementation In High Efficiency Video Coding (H.265/HEVC)*, University of Gaziantep Graduate School of Natural & Applied Sciences, M. Sc. Thesis, Gaziantep, 2012, s.27.

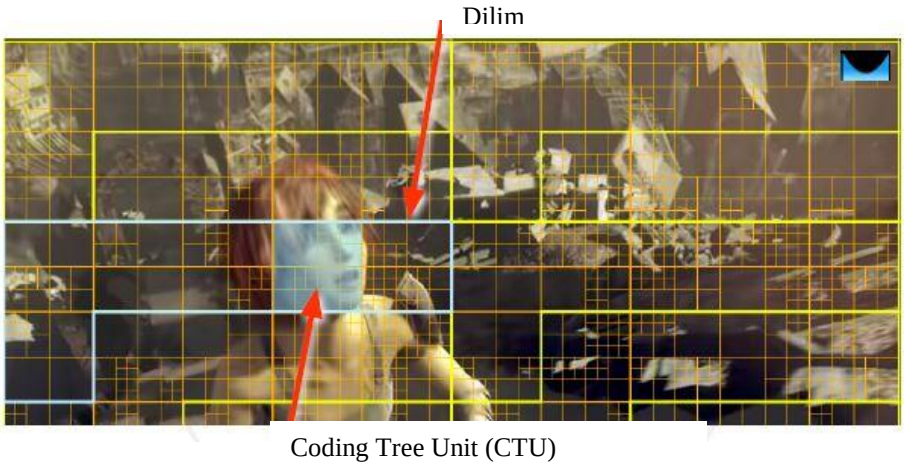
olması durumunda 32×32 büyüklüğünde CU kullanılırken; 4 olması durumunda 8×8 büyüklüğünde CU kullanılmaktadır. Derinlik ve seçilen CU büyüklüğüne ilişkin ayrıntılı bilgi Şekil 2.41'de gösterilmektedir.[98]



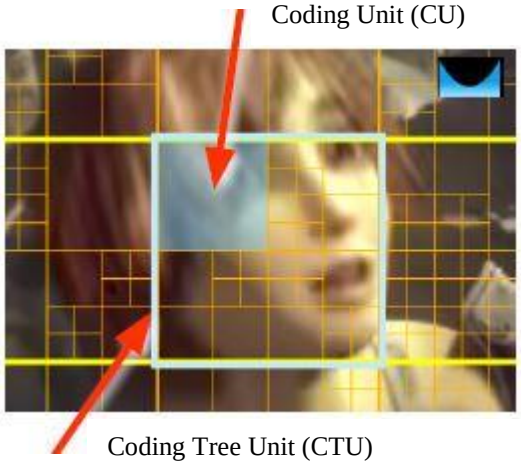
Şekil 2.41 Farklı derinlik değerleri için CU bölümlendirmesi

Görüntü çerçevesini oluşturan dilim, dilimi oluşturan CTU ve CTU birimini oluşturan CU Şekil 2.42 ve 2.43'te gösterilmektedir. Şekil 2.42 incelendiğinde 64×64 büyüklüğünde CTU'yu oluşturan 2 adet 32× 32 büyüklüğünde CU'nun dilimin sol üst ve sağ alt kısmında olduğu görülmektedir. Ayrıca, dilimin tamamı incelendiğinde derinliğin fazla olduğu alanların daha düşük büyüklüklerde CU ile temsil edildiği görülmektedir.

[98] Il-Koo Kim, Junghye Min, Tammy Lee, Woo-Jin Han ve JeongHoon Park, "Block Partitioning Structure in the HEVC Standard", *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, Cilt:22, Sayı:12, 2012, s.1700.



Şekil 2.42 H.265/HEVC teknolojisi dilim ve CTU yapısı [99]



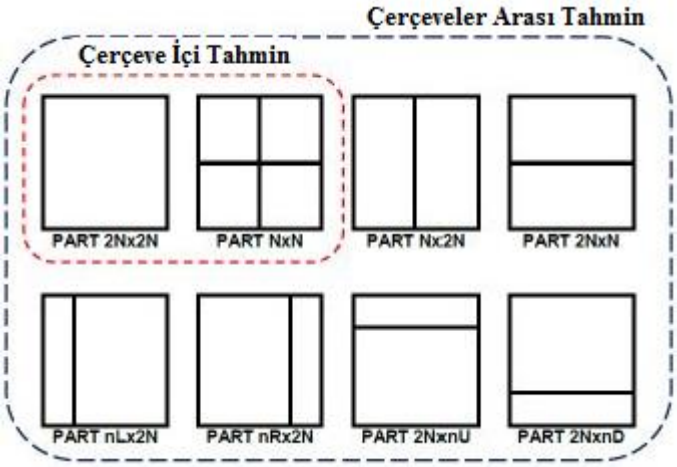
Şekil 2.43 H.265/HEVC teknolojisi CU yapısı [100]

2.4.3.2.3. PU ve PB Birimleri

H.265/HEVC, kodlama ağacı yapısı gereği CU'nun farklı büyüklüklerde PU birimlerine bölünebilmesine imkân vermektedir. PU, CTU ve CU birimlerinde olduğu gibi parlaklık bileşenini oluşturan bir adet PB (Prediction Block) ve renklilik bileşenini oluşturan iki adet PB biriminden oluşmaktadır. PU, kodlama ağacı yapısı gereği CU birimlerinin yaprağı olarak adlandırılmaktadır. PU, CTU ve CU birimlerinin aksine kare boyutlarda olmak zorunda değildir. Her bir CU tahmin

[99] Iain E.G. Richardson, *An Introduction to High Efficiency Video Coding*, VCODEX Video Compression, 2013.
http://www.vcodex.com/hevc-an-introduction-to-high-efficiency-coding/ (29.09.2015)
[100] a.g.k.

moduna bağlı olarak bir, iki veya dört PU biriminden oluşacak şekilde bölümlendirilebilir. Şekil 2.44'te sekiz farklı PU boyutu gösterilmiştir. PU boyutlarından ikisi kare ($2N \times 2N, N \times N$), ikisi dikdörtgen ($2N \times N, N \times 2N$) ve dördü asimetrik ($2N \times nU$, $2N \times nD$, $nL \times 2N, nR \times 2N$) şekildedir.[101] Tüm boyutlar, çerçeveler arası kodlamada kullanılabilirken çerçeve içi kodlamada sadece kare büyüklükler kullanılabilmektedir. CU biriminin aksine PU iki kez üst üste bölümlendirilebilir. 4×4 büyüklüğündeki PU, çerçeveler arası kodlamada kullanılamadığı için tercih edilmemektedir.



Şekil 2.44 Kare, dikdörtgen ve asimetrik PU boyutları [102]

PU birimlerine ait kare ve asimetrik bölümlendirmenin görüntüyü oluşturan dilimde nasıl kullanıldığı Şekil 2.45'te gösterilmektedir. Dilimin merkezinde bulunan 64×64 büyüklüğündeki PU birimine ait tahmin kendisinden önce gelen referans kareler aracılığıyla çerçeveler arası tahmin kullanılarak elde edilmektedir. Dilimin sağında bulunan 8×16 boyutundaki PU ise içinde bulunduğu 32×32 büyüklüğündeki CU biriminin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır.

[101] Il-Koo Kim, J. Min, T. Lee, Woo-Jin Han ve J. Park, 2012, s.1701.
[102] A. Öztekin, 2012, s.33.

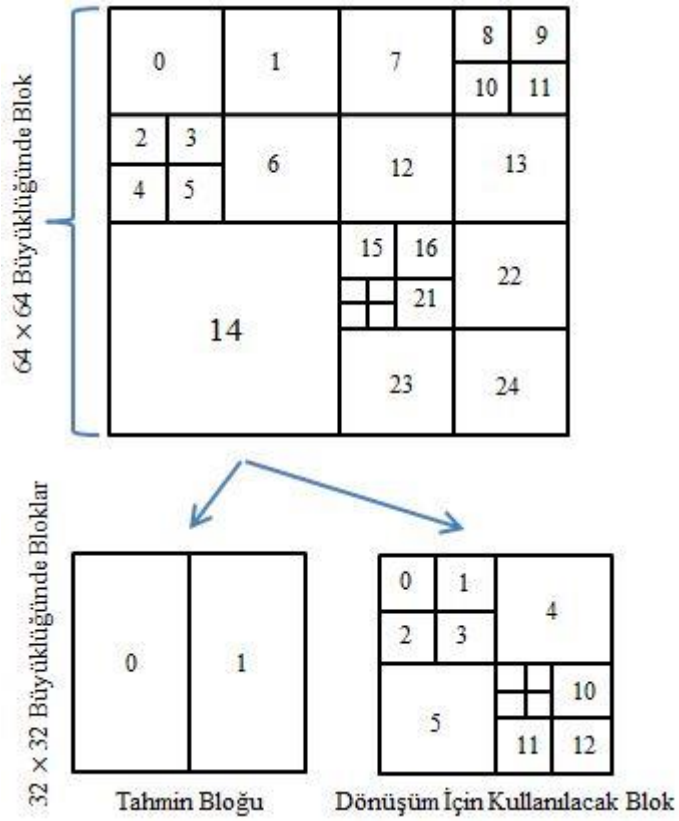


Şekil 2.45 H.265/HEVC teknolojisi PU yapısı [103]

2.4.3.2.4. TU ve TB Birimleri

H.265/HEVC teknolojisinin temel bölümü PU birimlerinin tanımlanmasında ve dönüşüm işleminin gerçekleştirilmesinde kullanılan TU olarak kabul edilmektedir. H.265/HEVC, görüntü çerçeveleri arasındaki piksel farklılıklarından oluşan artık değerlerin dönüşümünün gerçekleştirilebilmesi için TU birimlerini kullanmaktadır. TU birimleri için ayrıca bir kodlama ağacı yapısı oluşturulmakta ve artık kodlamalı ağaç yapısı (RQT: Residual Quad-Tree Structure) olarak adlandırılmaktadır. RQT yapısı gereği TU, CU birimlerinin alt dallarını oluşturmaktadır. Dolayısıyla, ağacın çatısını CTU birimi yerine CU oluşturmaktadır. Artık blok, kodlama ağacı yapısında olduğu gibi yapraklara ayrılır ve her bir yaprak için ayrı ayrı dönüşüm işlemi gerçekleştirilir. TU birimleri kare haldedir ve bir önceki bölümde anlatılan H.264/AVC teknolojisinde olduğu gibi dönüşüm ve niceleme adımlarından geçmektedir. Şekil 2.46'da TU bölümlendirmesi gösterilmektedir.[104]

[103] Iain E.G. Richardson, 2013.
[104] Tung Nguyen ve diğ., "Transform Coding Techniques in HEVC", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Cilt: 7, Sayı:6, 2013, s.979.



Şekil 2.46 H.265/HEVC teknolojisi TU yapısı

Şekil 2.46'da 64 ×64 büyüklüğündeki CTU, ilk önce 32×32 büyüklüğündeki CU birimlerine bölünmektedir. Ardından 14 numaralı CU 0 ve 1 numaralı PB birimlerine, bir önceki görüntü çerçevesinden elde edilen artık değerlerin dönüşümü için de TU birimlerine bölünmektedir.

TU büyüklüğü her zaman kare şekilde olmak zorundadır ve 4×4, 8×8, 16×16 ve 32×32 büyüklüklerinde olabilir. Her bir TU için standart dönüşüm tekniği olarak DCT tanımlanmış ancak TU büyüklüğünün 4×4 olduğu durumda DST (Discrete Sine Transform) tekniği kullanılmaktadır. CU için çerçeveler arası tahmin yapılırken TU büyüklüğü, PU büyüklüğünden büyük olabilmekte ancak çerçeve içi tahmin yapılırken TU büyüklüğü PU büyüklüğünden küçük veya eşit olmak zorundadır.[105] Seçilen TU büyüklüklerine göre sıkıştırma işleminin karmaşıklığı artmakta ve sıkıştırma süresi uzamaktadır. Bu sebepten ötürü, görüntü karmaşıklığının düşük olduğu alanlarda TU biriminin yüksek seçilmesi sıkıştırma verimliliğini

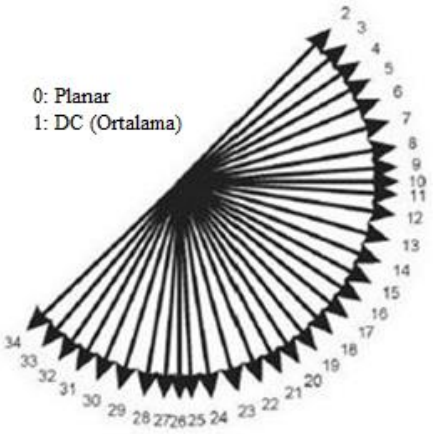
[105] G. J. Sullivan, J.R. Ohm, W.J. Han ve T. Wiegand, 2012, s.1651.

artırmaktadır. H.265/HEVC, bu seçim işlemini sahip olduğu algoritmalar aracılığı ile adaptif olarak gerçekleştirmektedir.

2.4.3.3. Çerçeve İçi Tahmin Yöntemi

H.265/HEVC, çerçeve içi kodlama yaparken H.264/AVC teknolojisinde olduğu gibi uzamsal benzerliği kullanmaktadır. Ancak H.265/HEVC, kodlama sırasında daha fazla yapısal bilgiden faydalanmaktadır. PU birimlerinin içerisinde yer alan bütün TU birimleri çerçeve içi tahminde parlaklık ve renklilik bileşenleri için aynı tahmin modlarını kullanmaktadır.

H.265/HEVC, çerçeve içi tahmin için 35 farklı mod tanımlamaktadır. (H.264/AVC teknolojisinde 9 farklı mod tanımlanmaktadır.) Sıkıştırma verimliliğini artırmak için, kodlayıcı her bir PU için ayrı ayrı modlar seçmektedir. Modlar, kodlama sırasında kullanılan tahmin yönünü belirtmektedir. Modlardan 33 tanesi açısal tahmin yönleri iken diğer ikisi Planar ve DC tahmin yönleridir. Mod 0, Planar tahmin yönünü Mod 1 ise DC tahmin yönünü tanımlamaktadır.[106] H.265/HEVC teknolojisinde çerçeve içi tahminde kullanılan yönler Şekil 2.47'de gösterilmektedir.



Şekil 2.47 H.265/HEVC'nin çerçeve içi tahminde kullanmış olduğu modlar [107]

[106] Jani Lainema, Frank Bossen, Woo-Jin Han, Junghye Min ve Kemal Ugur, "Intra Coding of the HEVC Standard", *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, Cilt:22, Sayı:12, 2012, s.1793.
[107] Elemental Technologies, 2013, s.8.

Artan mod sayısı H.265/HEVC teknolojisinin sıkıştırma performansını artıran en önemli etkenlerin başında gelmektedir. H.265/HEVC, çerçeve içi tahminde kullanılacak en verimli modu seçmek için MPM (Most Probable Mode) listesini kullanmaktadır. MPM listesi 3 farklı moddan oluşmakta ve bu modlar, işlem yapılan PU biriminin solunda ve üzerinde yer alan komşu PU birimleri referans alınarak oluşturulmaktadır. Eğer, solda ve üstte yer alan komşu PU birimlerinde kullanılan mod aynı olup Planar veya DC ise MPM listesi; Planar, DC ve Dikey Mod (Mod 26) aracılığıyla oluşturulur. Eğer, solda ve üstte yer alan komşu PU birimlerinde kullanılan mod açısal modlardan herhangi birisi ise MPM listesi; ilgili açısal mod ve iki tane komşu açısal mod aracılığıyla oluşturulur. Örnek verilecek olursa komşu PU biriminde kullanılan açısal mod 21 ise MPM listesi; mod 20, mod21 ve mod 22 aracılığıyla oluşturulmaktadır. Eğer, solda ve üstte yer alan komşu PU birimlerinde kullanılan modlar farklı ve açısal ise MPM listesi; ilgili açısal modlara Planar, DC veya Dikey Modlardan bir tanesinin eklenmesiyle oluşturulur. İşlem yapılan PU birimine ait tahmin modu seçildikten sonra kodlayıcı tarafından MPM listesine bakılır eğer ilgili mod MPM listesinde varsa sadece PU biriminin koordinat bilgisi dönüştürülür. Ancak, seçilen mod MPM listesinde yoksa kodlayıcı tarafından tekrar modlar arası tarama yapılır ve uygun olan mod seçilerek tam sayı dönüşümü gerçekleştirilir.[108] Bu bölüme kadar anlatılan adımlar parlaklık bileşenini tahmin ederken kullanılmaktadır.

Çerçeve içi tahminde renklilik bileşenini tahmin etmek için kodlayıcı en etkili 5 mod arasından seçim yapmaktadır. İlgili modlar Planar, DC, Dikey (Mod 26), Yatay (Mod 10) ve parlaklık parametresine ait tahmin yapılırken seçilen modun aynısı olarak sıralanabilir. Renklilik bileşeni için kullanılan tahmin yönü ve modu arasındaki ilişki Tablo 2.10'da gösterilmektedir.[109]

[108] G. J. Sullivan, J.R. Ohm, W.J. Han ve T. Wiegand, 2012, s.1658.
[109] Recommendation ITU-T H.265, *High Efficiency Video Coding Standard*, International Telecommunication Union, 2015, s.120'den aktaran A. Öztekin, 2012, s.38.

Tablo 2.10 Tahmin yönü ve modu arasındaki ilişki (Renklilik bileşeni)

Çerçeve İçi Tahminde Renklilik Bileşeni İçin Tanımlanan Modlar	Çerçeve İçi Tahmin Yönü				
	0	26	10	1	X (0<=X<=34)
0	34	0	0	0	0
1	26	34	26	26	26
2	10	10	34	10	10
3	1	1	1	34	1
4	0	26	10	1	X

Renklilik bileşeni için mod 4 seçilirse parlaklık bileşenini tahmin etmek için kullanılan mod yönünün aynısı renklilik bileşeni için de uygulanır. Eğer, renklilik bileşeni için mod 4 dışında bir mod seçilirse, parlaklık bileşenini tahmin etmek için kullanılan mod yönünün değerine göre renklilik bileşeni için kullanılan mod yönü de farklılık göstermektedir. Örnek verilecek olursa renklilik bileşeninin tahmini için mod 1 seçilirse renklilik bileşenine ait dikey yönde tahmin için mod 34 kullanılmaktadır. (*"çerçeve içi tahminde renklilik bileşeni için tanımlanan modlar" sütunundaki mod 1 ile "çerçeve içi tahmin yönü" sütunundaki mod 26'nın kesiştiği nokta yardımıyla bulunur.*)

H.265/HEVC, çerçeve içi tahmin sırasında yukarıda anlatılan modların dışında özel durumlar için I-PCM ve Transform Skipped Mode (Dönüşümün Gerçekleştirilmediği Mod) olarak adlandırılan iki farklı yöntem daha kullanmaktadır. I-PCM yöntemi, sinyalin verimli bir şekilde kodlanamayacağı durumlarda sinyale uygulanması gereken tahmin, dönüşüm, niceleme ve entropi kodlama aşamalarının atlanması şeklinde gerçekleşmektedir. Transform Skipped Mode'da ise sadece dönüşüm adımı atlanmaktadır. Bu iki mod, blok büyüklüklerinin 4×4 olduğu durumlarda içeriğin değişimine yol açtığı için çok fazla tercih edilmemektedir.

H.265/HEVC, H.264/AVC teknolojisinde olduğu gibi bloklar arası geçişleri yumuşatmak için filtre kullanmaktadır. Filtreleme işlemi, komşu bloklar arasındaki keskin geçişleri önlemek amacıyla dönüşüm adımından önce uygulanmaktadır. Eğer, çerçeve içi tahmin için DC mod seçilirse veya TU boyutu 4 × 4 büyüklüğünde olursa filtreleme işlemi uygulanmamaktadır.

2.4.3.4. Çerçeveler Arası Tahmin Yöntemi

H.265/HEVC, çerçeveler arası tahmin için inter, skip ve merge olmak üzere 3 farklı mod kullanmaktadır. Hangi mod tercih edilirse edilsin kodlayıcı tahmin öncesi en iyi 3 hareket vektörünü belirler ve uygun olan hareket vektörü tercih edilen moda uygulanır. AMVP (Advanced Motion Vector Prediction) olarak da adlandırılan inter modda tahmin indekslerini içeren hareket vektörleri, referans indeksler, hareket vektörleri arasındaki farklar ve tahminler arasında oluşan sinyal değerlerinin çıkarılmasıyla elde edilen artık verilerin tamamı dönüştürülmektedir. Merge modda ise işlem yapılan PU'dan önceki PU'nun çerçeveler arası tahminde kullanmış olduğu hareket yönü kullanılmaktadır. İşlem yapılan PU, kendisinden önce kodlanmış olan PU birimine ait hareket vektör yapısı ile ilgili her parametreyi kullanmaktadır. Merge ve skip modda sadece hareket indeksleri ve artık veriler dönüştürülmektedir.[110] [111]

H.265/HEVC, çerçeveler arası tahmini 8 farklı blok aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Bu bloklardan 4 tanesi simetrik olarak kullanılırken diğer 4 tanesi asimetrik olarak kullanılmaktadır. İlgili blok yapısı, PU kısımlarının anlatıldığı Bölüm 2.4.3.2.3'te yer alan Şekil 2.44'te gösterilmektedir.

H.264/AVC teknolojisinde olduğu gibi, çerçeveler arası tahmin için büyük blokların seçilmesi halinde hareket vektörleri ve blok boyutunun tipi için kullanılacak bit miktarı azalmakta ancak artıklık (fark) bloğunu kodlamak için kullanılacak dönüşüm kat sayıları için çok fazla bit gerekmektedir. Diğer taraftan, küçük boyutlu blokların seçilmesi halinde artıklık (fark) bilgisini iletmek için gerekli olan bit miktarı azalmakta ancak blok sayısının artması halinde hareket vektörü ve blok tipleri için kullanılan bit miktarı artmaktadır.

---

[110] Jian-Liang Lin, Yi-Wen Chen, Yu-Wen Huang ve Shaw-Min Lei, "Motion Vector Coding in the HEVC Standard", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Cilt:7, Sayı:6, 2013, s.957-958.

[111] Alberto Duenas, *Development of a 4K 10-Bits HEVC Encoder*, IBC Conference, 2013, s.6. http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/ibc.2013.0003 (10.07.2015)

H.265/HEVC, H.264/AVC teknolojisine göre çerçeveler arası tahminde çerçeve içi tahminde olduğu gibi daha fazla blok desteği sunmaktadır. Ayrıca, çerçeveler arası tahmini gerçekleştirmek için kodlayıcı tarafından belirlenen tahmin yönleri H.265/HEVC teknolojisinde daha verimli çalışmaktadır. Söz konusu ek özellikler sayesinde H.265/HEVC çerçeveler arası tahminde H.264/AVC teknolojisine göre çok daha başarılıdır.

2.4.3.5. Dönüşüm, Niceleme ve Entropi Kodlama İşlemleri

H.265/HEVC, H.264/AVC teknolojisinde olduğu gibi tamsayı dönüşümünü kullanmaktadır. Tam sayı dönüşümü, dönüşüm işleminin hızlı gerçekleşmesini sağlamaktadır. Dönüşüm işlemi, her blok için ayrı ayrı gerçekleştirilmektedir. H.265/HEVC, çerçeve içi ve çerçeveler arası tahmin yöntemlerinde daha çok blok desteği sunması sayesinde dönüşüm işleminin üzerine binen yükü azaltmaktadır. H.265/HEVC teknolojisi dönüşüm için 4×4, 8×8, 16×16 ve 32×32 büyüklüğünde bloklar kullanmaktadır. Dönüşümde kullanılan blok yapısının esnekliği genel sıkıştırma verimliliği üzerinde %10 etkilidir.[112] H.265/HEVC, niceleme işlemini H.264/AVC teknolojisinde kullanılan teknikler aracılığıyla gerçekleştirmektedir.

H.264/AVC teknolojisinde entropi kodlama işlemi, CABAC ve CAVLC yöntemleri kullanılarak iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. H.265/HEVC, sadece CABAC yöntemini kullanmaktadır. CABAC, CAVLC yöntemine göre daha fazla işlemci gücü gerektirmekte ancak %15 daha fazla sıkıştırma kazancı sağlamaktadır.[113]

- Mod ve Hareket Vektörü Tahmini: H.265/HEVC, işlem yapılan çerçeve öncesinde kodlanmış çerçevede kullanılan modlar ile hareket vektörü

[112] Madhukar Budagavi, Arild Fuldseth, Gisle Bjøntegaard, Vivienne Sze ve Mangesh Sadafale, "Core Transform Design in the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard", *IEEE Journal Of Selected Topics In Signal Processing*, Cilt:7, Sayı:6, 2013, s.1029-1039.
[113] Vivienne Sze ve Madhukar Budagavi, *Design and Implementation of Next Generation Video Coding Systems*, ISCAS Tutorial, 2014, s.48-49.

tahmin bilgisini birleştirerek işlem yapılan ve sonrasında kodlanacak olan çerçeveler hakkında daha başarılı bir tahmin gerçekleştirebilmektedir.[114]

- Deblocking Filter (Bloklama Azaltıcı Filtre): Bloklama azaltıcı filtre, bloklar arasında dönüşüm sonrası oluşan keskin geçişleri engellemek amacıyla hem parlaklık hem de renklilik bileşenleri için ayrı ayrı uygulanmaktadır. H.264/AVC'de 4×4 büyüklüğünde bloklar arasına uygulanırken H.265/HEVC'de 8×8 büyüklüğünde bloklar arasına da uygulamaktadır.[115]
- Sample Adaptive Offset (Örnek Dengeli Ayarlama): SAO, kodu çözülmüş video çerçevelerinin ayarlanmasını sağlayan, pürüzsüz bölgeler ve nesnelerin kenar görünümünü artıran ve isteğe bağlı uygulanan bir filtredir. SAO filtresi, genel sıkıştırma verimliliği %3.5 - 6 oranında artırmaktadır.[116] [117]

SAO ve bloklama azaltıcı filtre uygulanan ve uygulanmayan görüntü kareleri Şekil 2.48'de gösterilmektedir.



Filtrelenmeyen görüntü Filtrelenen görüntü

Şekil 2.48 H.265/HEVC teknolojisi filtreleme işlemi (SAO ve Bloklama Azaltıcı)

[114] G. J. Sullivan, J.R. Ohm, W.J. Han ve T. Wiegand, 2012, s.1652.
[115] a.g.m., s.1652.
[116] Chih-Ming Fu ve diğ., "Sample Adaptive Offset in the HEVC Standard", *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, Cilt:22, Sayı:12, 2012, s.1755-1783.
[117] Jérôme Vieron, *HEVC: High-Efficiency Video Coding (Next Generation Video Compression)*, WBU-ISOG Forum, 2012, s.25.

2.4.3.6. Profil, Katman ve Seviyeler

H.265/HEVC, çok çeşitli uygulama alanlarında kullanım olanağına sahiptir. Her uygulama için farklı bit hızı, çözünürlük, hata kontrolü ve kalite gerektiği için karmaşıklığı azaltmak amacıyla çeşitli profil, katman ve seviyeler tanımlanmıştır.

2.4.3.6.1. Profiller

H.265/HEVC teknolojisinin ilk sürümünde Main, Main 10 ve Main Still Picture olmak üzere 3 farklı profil tanımlanmıştır. 2014 Temmuz ayında yayınlanan ikinci sürümünde kullanım alanını genişletmeye yönelik 21 profil, ayarlanabilir sıkıştırma yapabilmek için 2 profil ve çoklu ortamlarda kullanım için 1 profil daha tanımlanmıştır. İkinci sürümde eklenen profiller, farklı bit derinliklerinde sıkıştırma, 4:2:2/4:4:4 resim örneklemesi, çoklu ortam kodlaması ve ayarlanabilir video sıkıştırma gibi özellikler içermektedir. 2015 Ocak ayında yayınlanan üçüncü sürümde ise 3D görüntülerin sıkıştırılması için belirlenen profillerin yanı sıra bazı profillerin genişletilmesi sağlanmıştır.[118] Sayısal televizyon yayıncılığında genellikle ilk sürümde geliştirilen profiller kullanılmaktadır. Dünya genelinde özellikle sayısal yayınların sıkıştırılması için Main 10 profili tercih edilmektedir.

Main

Main profili, en yaygın olarak kullanılan görüntü ve video örnekleme formatı olan 4:2:0 için geliştirilmiş ve her piksel için 8 bit derinlik desteği sunmaktadır.

Main 10

Main 10 profili, Main profili gibi 4:2:0 örnekleme formatı için geliştirilmiş ancak Main profilinin aksine 8 bitten 10 bite kadar derinlik desteği sunmaktadır. Yüksek bit derinliği, çok daha fazla renk seçeneğini beraberinde getirmektedir.

[118] Recommendation ITU-T H.265, *High Efficiency Video Coding Standard*, International Telecommunication Union, 2015, s.225-241.

Ayrıca, yüksek bit derinliği sıkıştırma sonrası elde edilen görüntü ile sıkıştırma öncesi var olan görüntüler arasında yumuşak bir geçiş sağlamaktadır. Main 10 profili, Main ve Main 10 profilleri ile kodlanan videoları çözebilmektedir.

Main 10 profilinin sunmuş olduğu 10 bit derinlik desteği UHD teknolojisinde kullanılmaktadır. UHD teknolojisinde kullanılan 10 bit renk derinliği Rec. 2020 Renk Uzayı olarak adlandırılmaktadır.

PSNR değerine ilişkin 2013 Nisan ayında yapılan çalışmada 3840×2160 çözünürlüğünde 10 bit derinliğe sahip video, Main 10 profil ve aynı videonun 8 bit derinliğe dönüşümü gerçekleştirilerek Main profil ile sıkıştırılmıştır. Sonuç olarak, Main 10 profili ile sıkıştırılan videonun çerçeveler arası tahmin sırasında %5 daha fazla bit kazancı sağladığı belirlenmiştir.

Main Still Picture

Main profili ile aynı desteği sunan Main Still Picture profili, videolar için değil tek bir görüntü karesinin sıkıştırılması için kullanılmaktadır. Main profili gibi, 4:2:0 örnekleme formatına sahip görüntülerde her piksel için 8 bit renk derinliği sunmaktadır.

2012 Mayıs ayında yapılan bir çalışmaya göre aynı PSNR değerinde H.265/HEVC ile sıkıştırılan görüntünün bit oranının, JPEG ile sıkıştırılan görüntüye göre %61 ve JPEG2000 ile sıkıştırılan görüntüye göre %20 daha az olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu çalışmada aynı MOS (Mean Opinion Score) değerinde H.265/HEVC ile sıkıştırılan görüntünün bit oranının, JPEG ile sıkıştırılan görüntüye göre %43 ve JPEG2000 ile sıkıştırılan görüntüye göre %31 daha az olduğu tespit edilmiştir.

H.265/HEVC teknolojisi, 4:2:0 örnekleme formatına sahip herhangi bir görüntüye uygulanması halinde görüntü sıkıştırma teknolojilerden daha fazla sıkıştırma kazancı elde edilmektedir.

2.4.3.6.2. Katmanlar

H.265/HEVC teknolojisinde genel uygulamalar için Main ve profesyonel uygulamalar için High Katmanı tanımlanmıştır. Sayısal yayınların sıkıştırılması için genellikle Main katmanına ait seviyeler kullanılmaktadır.

2.4.3.6.3. Seviyeler

H.265/HEVC teknolojisinde Main ve High katmanlarına ait 13 farklı seviye tanımlanmıştır. Seviyeler, H.265/HEVC ile sıkıştırılan videoların çözünürlükleri temel alınarak belirlenmiştir. Yüksek çözünürlüklü videolar için High katmanı kullanılırken düşük çözünürlüklü videolar için Main katmanı kullanılmaktadır. H.265/HEVC teknolojisine ait seviyeler Tablo 2.11'de gösterilmektedir.[119]

Tablo 2.11 H.265/HEVC teknolojisi seviyeleri

Seviye	Maksimum Örnekleme Oranı (Örnek/Saniye)	Bir Çerçevede Bulunan Maksimum Örnek Sayısı	Maksimum Bit Oranı (kbit/s)		Çözünürlük (Resolution) & Kare Hızı (Frame Rate)
			Main Katmanı	High Katmanı	
1	552.960	36.864	128	-	176 × 144 & 15.0
2	3.686.400	122.880	1500	-	352 × 288 & 30.0
2.1	7.372.800	245.760	3000	-	640 × 360 & 30.0
3	16.588.800	552.960	6000	-	960 × 540 & 30.0
3.1	33.177.600	933.040	10000	-	1280 × 720 & 30.0
4	64.846.720	2.228.224	12000	30.000	2048 × 1080 & 30.0
4.1	133.693.440		20000	50.000	2048 × 1080 & 60.0
5	267.386.880	8.912.896	25000	100.000	4096 × 2160 & 30.0
5.1	534.773.760		40000	160.000	4096 × 2160 & 60.0
5.2	1.069.547.520		60000	240.000	4096 × 2160 & 120.0
6		35.651.584	60000	240.000	8192 × 4360 & 30.0
6.1	2.139.095.040		120000	480.000	8192 × 4360 & 60.0
6.2	4.278.190.080		240000	800.000	8192 × 4360 & 120.0

[119] Recommendation ITU-T H.265, 2015, s.237.

Tablo 2.11 incelendiğinde SD ve HD videoların sıkıştırılmasında Main katmanına ait seviyeler kullanılırken Full HD, 4K ve 8K videoların sıkıştırılmasında High katmanına ait seviyeler kullanılmaktadır.

2.4.4. H.264/AVC ve H.265/HEVC Teknolojilerinin Karşılaştırılması

H.265/HEVC, H.264/AVC teknolojisine göre aynı kalitedeki videoyu yaklaşık olarak %50 daha az veri miktarı ile tanımlayabilmektedir. Veri miktarının önemli olmadığı (iletim kapasitesinin geniş olduğu) uygulamalar da ise H.265/HEVC ile sıkıştırılan videolar, H.264/AVC ile sıkıştırılan videolardan yaklaşık olarak iki kat daha kalitelidir.

H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojileri sahip oldukları sıkıştırma verimliliği sayesinde Youtube, Vimeo ve I Tunes gibi internetten video içeriğinin yoğun olarak paylaşıldığı platformlarda, Adobe Flash Player ve Microsoft Silverlight gibi web yazılımlarında, ATSC, ISDB ve DVB gibi sayısal televizyon yayıncılığı teknolojilerinde yoğun olarak kullanılmaktadır.

H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojilerinin benzer yönlerinin yanı sıra çok temel ve sıkıştırma performansını önemli ölçüde etkileyecek farklılıkları da bulunmaktadır. İlgili farklılıklar Tablo 2.12'de görüntülenmektedir.

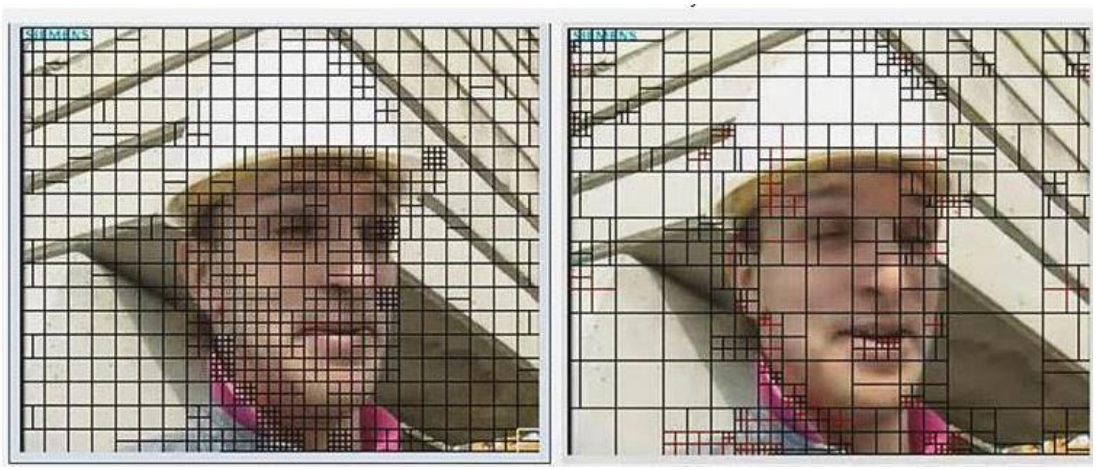
Tablo 2.12 H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojilerinin temel farklılıkları [120]

Sıkıştırma Teknolojileri	H.264/AVC	H.265/HEVC
Bölümlendirme Büyüklüğü	Her bir görüntü çerçevesi 16×16 büyüklüğünde makro bloklara ayrılabilmektedir.	Her bir görüntü çerçevesi 8×8, 16×16, 32×32, 64×64 büyüklüğünde makro bloklara ayrılabilmektedir.
Alt Bloklar	Her bir blok 4×4 büyüklüğünde alt bloklara ayrılabilmektedir.	Her bir blok 4×4 büyüklüğünde alt bloklara ayrılabilmektedir. Alt bloklar kare, simetrik ve asimetrik şekillerde olabilir ancak kare şekil sadece çerçeve içi tahmin yapılırken kullanılmaktadır.
Dönüşüm	Her bir görüntü çerçevesinin dönüşümü 8×8 veya 4×4 büyüklüğünde bloklar aracılığıyla DCT kullanılarak gerçekleştirilmektedir.	Her bir görüntü çerçevesinin dönüşümü 32×32, 16×16, 8×8 veya 4×4 büyüklüğünde bloklara aracılığıyla DCT kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sadece çerçeve içi tahminde 4×4 büyüklüğünde parlaklık bileşeni için DST uygulanmaktadır.
Çerçeve İçi Tahmin	9 farklı tahmin yönü kullanılmaktadır.	35 farklı tahmin yönü kullanılmaktadır.
Çerçeveler Arası Tahmin	3 farklı uzamsal mod kullanılmaktadır.	3 farklı uzamsal moda ek olarak zamansal mod da kullanılmaktadır.
Tahmin Derecesi	Parlaklık bileşeni için 1/2, renklilik bileşeni için 1/4 piksel doğruluklu tahmin yapılabilmektedir.	Parlaklık bileşeni için 1/4, renklilik bileşeni için 1/8 piksel doğruluklu tahmin yapılabilmektedir.
Entropi Kodlama	CABAC veya CAVLC yöntemleri kullanılmaktadır.	CABAC yöntemi kullanılmaktadır.
Kullanılan Filtreler	Bloklama etkisini önleyici filtre kullanılmaktadır.	Bloklama etkisini önleyici filtreye ek olarak SAO filtresi de kullanılmaktadır.

H.265/HEVC teknolojisi bölümlendirme, tahmin yönleri, dönüşüm, tahmin derecesi ve filtre sayısı gibi özellikler bakımında H.264/AVC teknolojisine göre daha esnek ve gelişmiş bir yapı sunması sayesinde sıkıştırma verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

[120] Matthew Goldman, *High Efficiency Video Coding (HEVC)*, Ericsson, 2014, s.16. https://www.smpte.org/sites/default/files/section-files/HEVC%20tutorial%20C.pdf (16.10.2015)

H.264/AVC, ölçeklendirmeleri blok - blok yaparken H.265/HEVC, benzer alanları bir bütün halinde algılayarak daha büyük bloklar aracılığıyla yapmaktadır. Bu durum, sıkıştırma verimliliğini ve ölçeklendirme hızını önemli ölçüde etkilemektedir. H.264/AVC, sıkıştırılacak görüntü verisini en fazla 16×16 büyüklüğünde bloklar ile H.265/HEVC ise 64×64 büyüklüğünde CTU birimleri ile ifade etmektedir.



H.264/AVC H.265/HEVC

Şekil 2.49 H.264/AVC ve H.265/HEVC bölümlendirme işlemi [121]

Şekil 2.49'daki video karesi incelendiğinde konuşan kişinin arkasındaki bölgenin sabit kaldığı görülmektedir. İlgili bölge, H.265/HEVC teknolojisinde 64×64 büyüklüğünde CTU birimleri aracılığı ile ifade edilmektedir. Aynı alanın ifade edilebilmesi için H.264/AVC teknolojisinde 16 adet 16×16 büyüklüğünde blok kullanılmaktadır. Görüldüğü üzere, H.265/HEVC tek bir CTU aracılığıyla daha büyük bir alanın temsil edilmesini sağladığı için çok daha verimli bir sıkıştırma imkânı sunmaktadır.

Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica kuruluşu çalışanlarından Gustavo Marrero Callicó ve Sebastián López Suárez tarafından hazırlanan "Wide Comparison Between H.264/AVC and H.265/HEVC" isimli dokümanda H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojileri ile sıkıştırılan farklı video formatlarına ilişkin kalite ve bit oranları karşılaştırması detaylı olarak ele alınmıştır.

[121] http://www.cnet.com/news/what-is-hevc-high-efficiency-video-coding-h-265-and-4k-compression-explained/ (15.10.2015)

İlgili dokümanda Coastguard (Bir sahil güvenlik botunun olay yerine hareket ettiği video karesi), Foreman (Bir işçinin konuşma yaptığı video karesi), Mobile (Yüksek fps oranına sahip görüntü karesi), News (Haber programında iki tane spikerin konuştuğu video karesi) video formatları sırasıyla H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojileri ile sıkıştırılarak sonuçlar ortaya konmuştur. Sıkıştırılan formatlar Şekil 2.50'de gösterilmektedir.



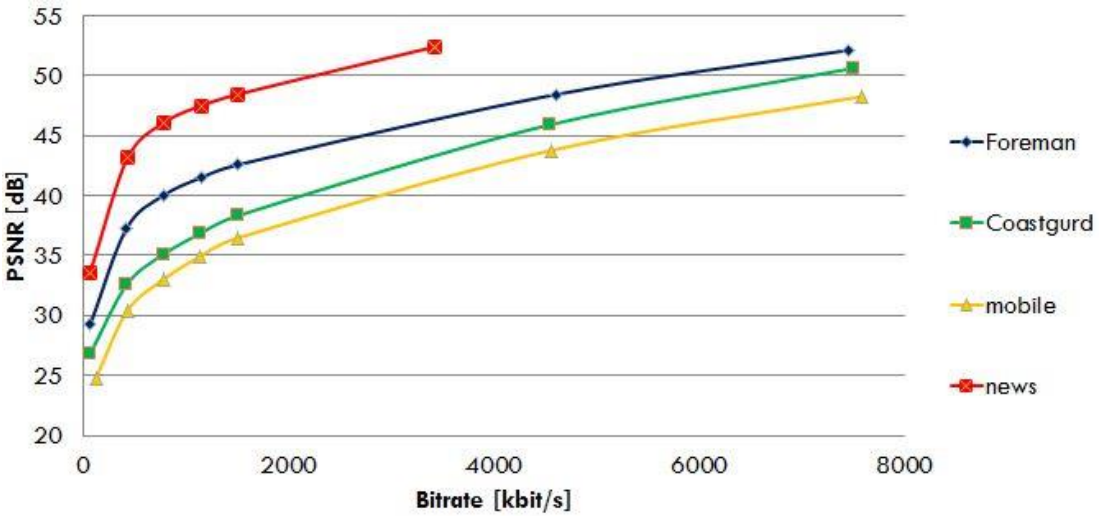
Şekil 2.50 H.264/AVC ve H.265/HEVC'nin uygulandığı video formatları [122]

İlgili video formatlarının özellikleri aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- Coastguard, hareket fazla olup uzamsal artıklık normal seviyededir.
- Foreman, hareket az olup uzamsal artıklık normal seviyededir.
- Mobile, hareket fazla olup uzamsal artıklık düşüktür.
- News, hareket az olup uzamsal artıklık fazladır.

İlgili video formatlarının H.264/AVC ile sıkıştırılması sonucu elde edilen PSNR değerleri Şekil 2.51'de gösterilmektedir. PSNR değerinin yüksek olması sıkıştırma sonucu oluşan video kalitesinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

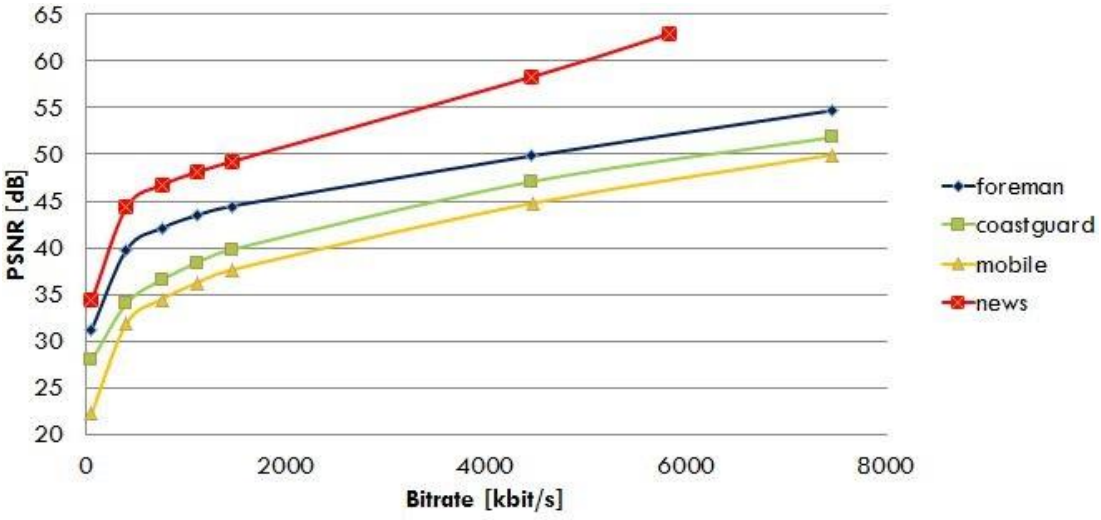
[122] Gustavo Marrero Callicó ve Sebastián López Suárez, *Wide Comparison Between H.264/AVC and H.265/HEVC*, 2014, s.42. http://www.slideshare.net/mwalendo/h264vs-hevc (23.10.2015)



Şekil 2.51 H.264/AVC ile sıkıştırılan Coastguard, Foreman, Mobile ve News video formatlarının PSNR değerleri [123]

Şekil 2.51 dikkatle incelenirse, hareketin az olması ve artıklık verisinin çok olmasından dolayı en yüksek sıkıştırma verimi News formatında, hareketin fazla olması ve artıklık verisinin düşük olmasından dolayı en düşük sıkıştırma verimi ise Mobile formatında elde edilmektedir.

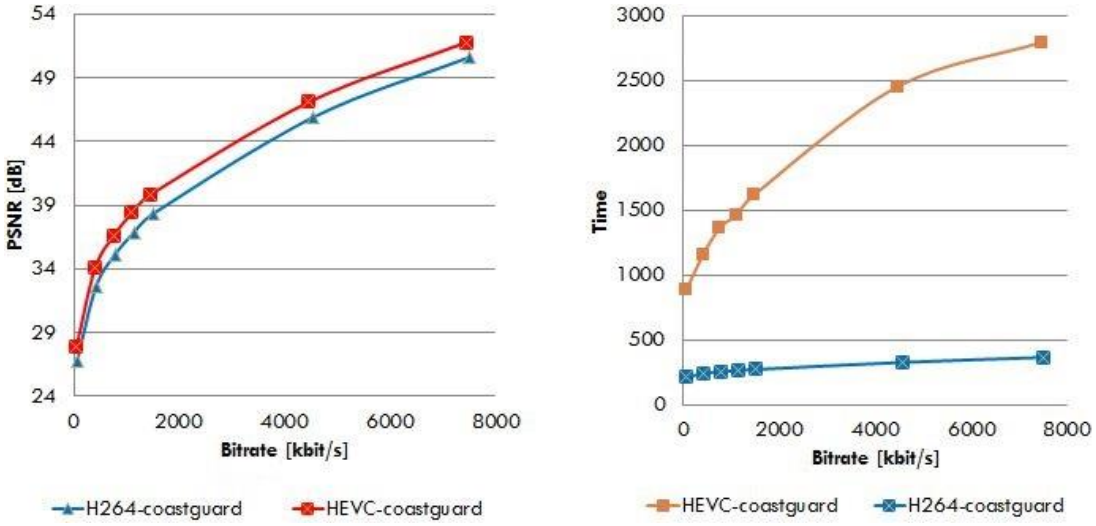
Şekil 2.52'de ise aynı video formatlarının H.265/HEVC ile sıkıştırılması sonucu elde edilen PSNR değerleri gösterilmektedir.



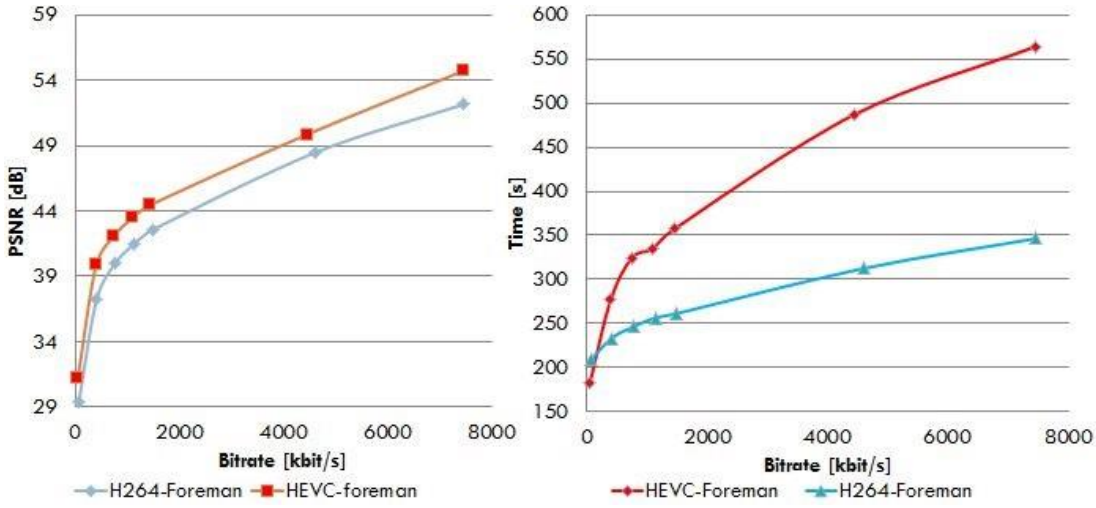
Şekil 2.52 H.265/HEVC ile sıkıştırılan Coastguard, Foreman, Mobile ve News video formatlarının PSNR değerleri [124]

[123] a.g.m., s.43.
[124] a.g.m., s.47.

Şekil 2.51 ve 2.52 incelenirse H.265/HEVC ile sıkıştırılan video formatlarının PSNR değerinin H.264/AVC ile sıkıştırılan video formatlarına göre yaklaşık 3 dB daha fazla olduğu görülmektedir. 3 dB fark, H.265/HEVC ile sıkıştırılan video formatının H.264/AVC ile sıkıştırılan video formatına oranla iki kat daha kaliteli olduğu anlamına gelmektedir. Tüm video formatlarına ait dB kazançları tek bir şekil üzerinde gösterildikten sonra farkın net olarak anlaşılabilmesi için Şekil 2.53, 2.54, 2.55 ve 2.56'de ayrı ayrı gösterilmektedir. Ayrıca, ilgili şekillerde iki farklı teknolojiye ait sıkıştırma süreleride gösterilmektedir.

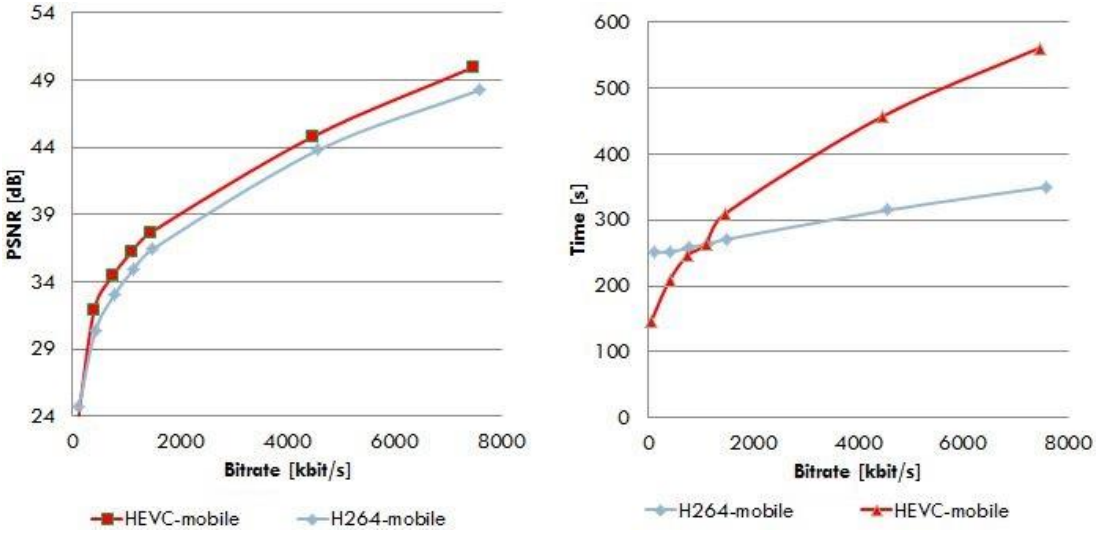


Şekil 2.53 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan Coastguard video formatına ilişkin PSNR değeri ve sıkıştırma süreleri [125]

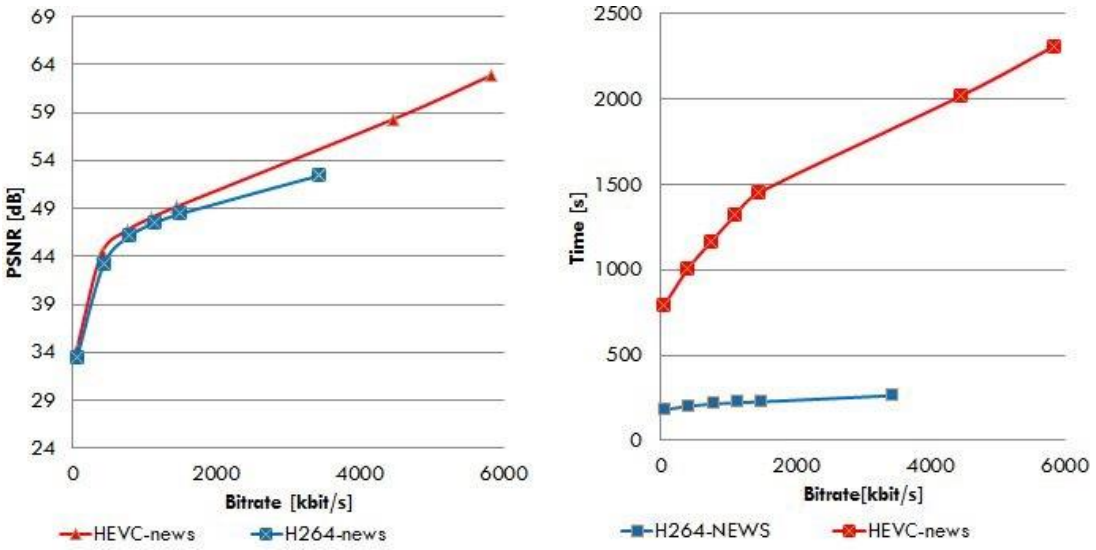


Şekil 2.54 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan Foreman video formatına ilişkin PSNR değeri ve sıkıştırma süreleri [126]

[125] a.g.m., s.62.



Şekil 2.55 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan Mobile video formatına ilişkin PSNR değeri ve sıkıştırma süreleri [127]



Şekil 2.56 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan News video formatına ilişkin PSNR değeri ve sıkıştırma süreleri [128]

H.265/HEVC ile sıkıştırılan video formatları, H.264/AVC ile sıkıştırılan video formatlarına oranla ortalama 2 - 3 dB aralığında daha kalitelidir. Ancak, bu noktada H.265/HEVC teknolojisinin en büyük dezavantajı olarak gösterilen süre problemi ortaya çıkmaktadır. H.265/HEVC, yüksek sıkıştırma performansını karmaşık yapısına borçludur ancak ilgili karmaşık yapı sıkıştırma süresinin

[126] a.g.m., s.61.
[127] a.g.m., s.62.
[128] a.g.m., s.64.

uzamasına neden olmaktadır. Günümüzde H.265/HEVC teknolojisi ile alakalı en önemli çalışmalar sıkıştırma süresinin azaltılmasına yönelik olarak gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda, 2015 ve 2016 yılları içerisinde gerçek zamanlı sıkıştırma yapabilen H.265/HEVC kodlayıcıları farklı şirketler tarafından geliştirilmiştir. Gerçek zamanlı H.265/HEVC kodlayıcılarının geliştirilmesi, sayısal televizyon yayıncılığı aracılığıyla aktarılan canlı yayınların sıkıştırılabilmesini sağlamaktadır.

Alman Fraunhofer şirketi yapmış olduğu çalışmada, H.265/HEVC ve H.264/AVC ile aynı kalite ölçütü belirlenerek sıkıştırılan videolar arasında veri boyutu açısından iki kat fark olduğunu belirtmektedir. Bu durum, özellikle hareketin çok fazla olduğu videolarda daha net ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.57'de her iki teknoloji ile aynı kalitede sıkıştırılan videoların bit oranı ve dosya boyutu vb. gibi özellikleri yer almaktadır.



Şekil 2.57 Aynı PSNR değerinde (kalitede) sıkıştırılan H.264/AVC ve H.265/HEVC video kareleri

Şekil 2.57'de görüldüğü gibi sıkıştırma öncesi PSNR değeri 39.72 dB olarak seçilen iki farklı videonun, sıkıştırma sonrası dosya boyutları ve bit oranları arasında iki kat fark oluşmaktadır. (3.10 MB: H.264/AVC - 6.01 MB: H.265/HEVC)

H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojilerinin kendilerinden önce üretilen MPEG-4, H.263, MPEG-2 ile karşılaştırması Tablo 2.13 ve 2.14'te gösterilmektedir. Karşılaştırma, hareketli ve durağan videolar için ayrı ayrı belirtilmektedir. Ayrıca,

Şekil 2.58'de ise ilgili teknolojilerin PSNR değerleri açısından karşılaştırması gösterilmektedir.

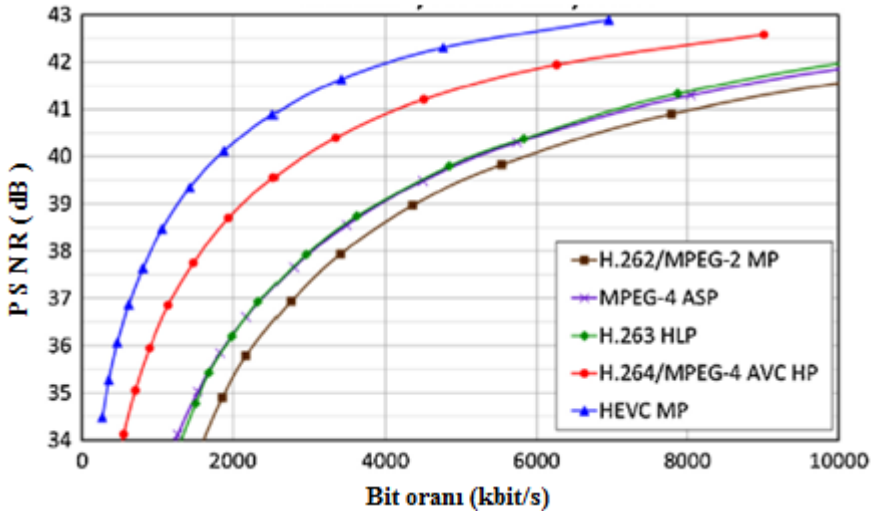
Tablo 2.13 Durağan videolar için sıkıştırma kazançları [129]

Sıkıştırma Teknolojisi	Bitrate Kazancı			
	H.264/AVC High Profil	**MPEG-4**	**H.263**	**MPEG2 & H.262**
H.265/HEVC Main Profil	%35.4	%63.7	%65.1	%70.8
H.264/AVC High Profil	-	%44.5	%46.6	%55.4
MPEG-4	-	-	%3.9	%19.7
H.263	-	-	-	%16.2

Tablo 2.14 Hareketli videolar için sıkıştırma kazançları [130]

Sıkıştırma Teknolojisi	Bitrate Kazancı			
	H.264/AVC High Profil	**H.263**	**MPEG-4**	**MPEG2 & H.262**
H.265/HEVC Main Profil	%40.3	%67.9	%72.3	%80.1
H.264/AVC High Profil	-	%46.8	%54.1	%67.0
H.263	-	-	%13.2	%37.4
MPEG-4	-	-	-	%27.8

[129] Jens-Rainer Ohm, Gary J. Sullivan, Heiko Schwarz, Thiow K. Tan ve Thomas Wiegand, "Comparison of the Coding Efficiency of Video Coding Standards – Including High Efficiency Video Coding (HEVC)", *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, Cilt:22, Sayı:12, 2012, s.1680.
[130] a.g.e., s.1680.



Şekil 2.58 Farklı video sıkıştırma teknolojilerinin PSNR değerleri [131]

H.265/HEVC, kendisinden önce üretilen teknolojilerden en az %35 daha fazla bit kazancı elde etmektedir. Durağan videolarda oluşan sıkıştırma kazancının, çok hareketli videolarda oluşan sıkıştırma kazancından daha az olduğu görülmektedir. H.265/HEVC, çerçeveler arası tahmin yönteminin daha gelişmiş teknikler kullanılarak gerçekleştirdiği için çok hareketli videolarda daha fazla sıkıştırma kazancı elde etmektedir.

İncelemeler, H.265/HEVC teknolojisinin standart haline geldiği 2013 yılında gerçekleştirilmiştir. Günümüzde daha gelişmiş kodlayıcıların geliştirilmesi ve yeni özelliklerin eklenmesiyle H.265/HEVC, H.264/AVC teknolojisine göre %50 daha fazla bit kazancı elde etmektedir. Avrupa Yayın Birliği (EBU) tarafından yapılan değerlendirmeler sonucu bu oranının önümüzdeki 5 yıl içerisinde %60 seviyelerine çıkacağı öngörülmektedir.

[131] a.g.e., s.1678.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

H.265/HEVC TEKNOLOJİSİNİN SAYISAL YAYINCILIĞA ETKİSİ

Analog yayıncılıktan sayısal yayıncılığa geçişle birlikte frekans spektrumu daha verimli kullanılmasına rağmen sayısal tekniklerin televizyon yayıncılığında kullanımı veri boyutunu artırmıştır. Artan veri boyutunu azaltma noktasında kayıplı sıkıştırma teknolojileri önemli çözümler sunmuştur.

Sayısal televizyon yayıncılığında HD görüntü teknolojisinin kullanılması H.264/AVC teknolojisi aracılığıyla gerçekleşmiştir. Ancak H.264/AVC, sürekli artan HD yayınların yanı sıra gelecekte yoğun olarak kullanılması beklenen 4K ve 8K yayınların sıkıştırılması noktasında yetersiz kalmıştır. Bunun üzerine 2013 yılında JVT grubu tarafından H.265/HEVC teknolojisi geliştirilmiştir.

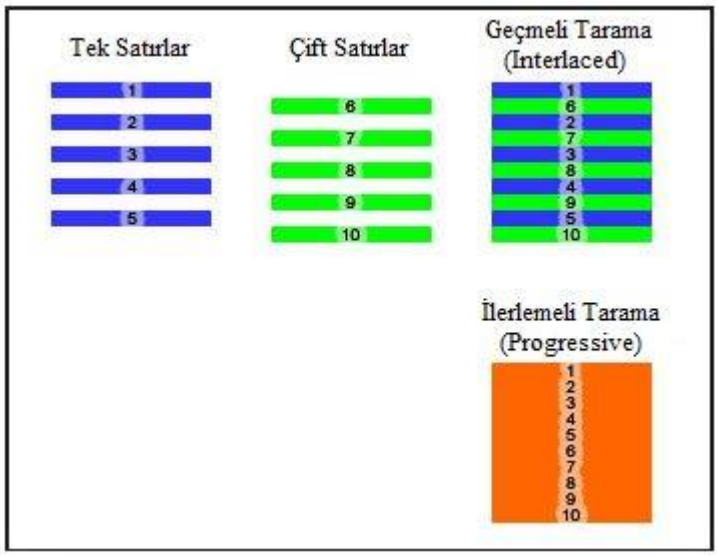
H.265/HEVC teknolojisinin sayısal yayıncılığa etkisine değinmeden önce sayısal televizyon yayıncılığında kullanılan görüntü teknolojilerinin aktarılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

3.1. SAYISAL TELEVİZYON YAYINCILIĞINDA KULLANILAN GÖRÜNTÜ TEKNOLOJİLERİ

Televizyon yayıncılığında kullanılan görüntü teknolojileri kullanmış oldukları piksel sayısı, tarama yöntemi vb. parametrelere göre sınıflandırılmaktadır. İlgili teknolojiler analog televizyon yayıncılığı döneminde yoğun olarak kullanılan SD, sayısal yayıncılığa geçişle önemini artıran HD ve izleyicilerin büyük ekran ve daha

yüksek görüntü kalitesi talebi doğrultusunda geliştirilen UHD (4K) ve 8K olarak sıralanabilir.

Televizyon yayınları, geçmeli ve ilerlemeli tarama olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Interlaced olarak adlandırılan geçmeli taramada, yayına ait görüntünün yarısı tek satırlarda diğer yarısı ise çift satırlarda verilmektedir. Progressive olarak adlandırılan ilerlemeli taramada ise yayına ait görüntünün tamamı her bir çerçevede bir bütün olarak verilmektedir. Bu nedenle, ilerlemeli taramada saniyedeki kare sayısı geçmeli taramanın iki katıdır. Özellikle hareketli yayınlarda ilerlemeli taramanın sunmuş olduğu görüntü kalitesi insan gözü tarafından net olarak algılanmaktadır. Geçmeli ve ilerlemeli tarama Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Geçmeli ve ilerlemeli tarama [132]

3.1.1. SD (Standard Definition) Görüntü Teknolojisi

Standart tanımlama olarak adlandırılan SD görüntü teknolojisi, analog televizyon yayın standartlarından PAL, SECAM ve NTSC tarafından yoğun olarak kullanılmakta olup PAL ve SECAM standartları 576i ve NTSC standardı ise 480i

[132] http://www.tvjuneau.com/?page=HDTV (03.12.2015)

geçmeli tarama yöntemlerini desteklemektedir. Kullanılan i harfi interlaced (geçmeli) taramayı ifade etmektedir. SD yayınlar, başlangıçta 4:3 çerçeve oranını kullanmış olsalar da 1990 yılından itibaren 16:9 çerçeve oranını kullanmaktadır. SD yayınlara ilişkin çerçeve oranı, çözünürlük vb. parametreler Tablo 3.1'de yer almaktadır.

Tablo 3.1 SD yayınlara ilişkin geçmeli tarama yöntem ve özellikleri

SD Yayınlara İlişkin Geçmeli Tarama Yöntemleri / Çerçeve Oranı	Çözünürlük
576i / 4:3	704×576 --- 720×576
576i / 16:9	704×576 --- 720×576
480i / 4:3	704×480 --- 720×480
480i / 16:9	704×480 --- 720×480

3.1.2. HD (High Definition) Görüntü Teknolojisi

Yüksek tanımlama olarak adlandırılan HD teknolojisi, geleneksel TV yayınlarının kullanmış olduğu SD teknolojisinden daha kaliteli görüntü imkânı sunmaktadır. HD teknoloji ile ilgili çalışmalar 1983 yılında ITU bünyesinde başlamıştır. ITU tarafından yayınlanan ITU-R BT.709-1 isimli tavsiye dokümanda HD teknolojisinin kullanmış olduğu tarama yöntemleri 720p (HD), 1080i (Full HD) ve 1080p (Full HD) olarak belirlenmiştir. Ayrıca, yine aynı dokümanda HD teknoloji için sadece 16:9 çerçeve oranı tanımlanmıştır.[133]

HD teknoloji, SD teknolojiye göre 4 kat daha fazla bant genişliği harcadığı için ticari olarak kullanılmaya başlaması 2000 yılının başlarında gerçekleşmiştir. HD teknoloji, özellikle 2003 yılında H.264/AVC teknolojisinin geliştirilmesiyle birlikte bütün sayısal yayıncılık ortamlarında kullanılabilir hale gelmiştir.

[133] Recommendation ITU-R BT.709-1, *HDTV standard for the studio and for international programme exchange*, International Telecommunication Union, 1993.

Full HD teknolojisi, HD teknolojinin geliştirilmiş sürümüdür. Daha yüksek çözünürlük ve daha kaliteli görüntü imkânı sunmaktadır. HD teknoloji için hazırlanan ITU tavsiye dokümanında Full HD formata ilişkin tanımlamalar ayrıca yapılmıştır. HD yayınlara ilişkin çerçeve oranı, çözünürlük vb. bilgiler Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2 HD yayınlara ilişkin geçmeli/ilerlemeli tarama yöntem ve özellikleri

HD Formatına Ait Geçmeli Tarama Yöntemleri / Çerçeve Oranı	Çözünürlük
720p (İlerlemeli Tarama)	1280×720
1080i/p (Geçmeli/İlerlemeli Tarama)	1920×1080

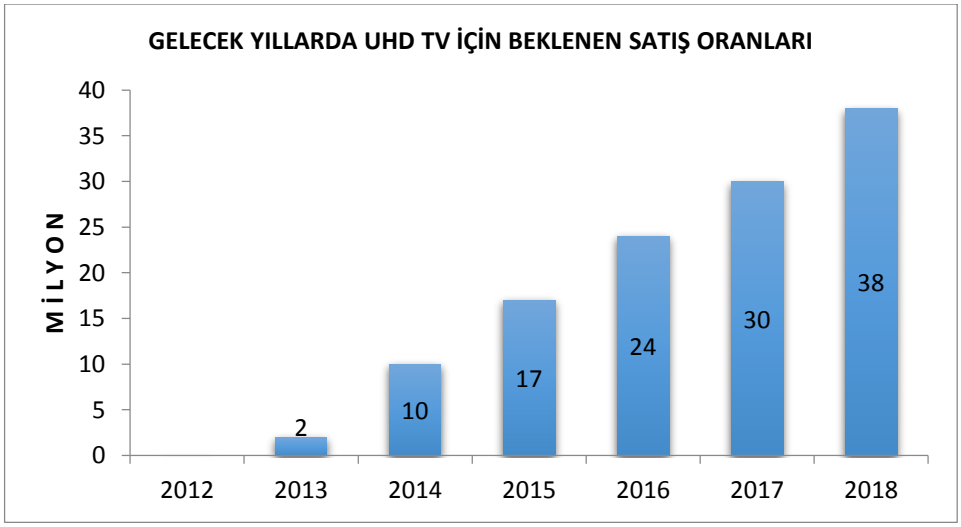
3.1.3. UHD/4K (Ultra High Definition/4K) Görüntü Teknolojisi

1994 yılında ilk kez sayısal televizyon yayıncılığına geçişin ardından 1998 yılında Birleşik Krallık'ta MPEG-2 sıkıştırma teknolojisi kullanılarak sayısal televizyon yayınlarının iletimi noktasında önemli bir adım atılmıştır. 2006 yılına gelindiğinde ise H.264/AVC teknolojisini kullanan HD yayınlar, özellikle Avrupa olmak üzere dünya genelinde çok geniş bir pazarda kendine yer bulmuştur. Günümüzde ise 4K olarak adlandırılan Ultra HD ve 8K çözünürlüğe sahip televizyonlar pazarda yer almaya başlamıştır. Her gelişen televizyon teknolojisi, yüksek çözünürlük ve kullanıcılara sunulan görüntü kalitesiyle tercih sebebi olmaktadır. Bu noktada en temel problem, artan görüntü kalitesinin çok ciddi bant genişliği tüketimine neden olması ve bu sorunun çözümünün önemli çalışmalar gerektirmesidir.

Full HD görüntüler, yatayda 1920 dikeyde 1080 piksel içermektedir. UHD görüntüler ise yatayda 3820 ve dikeyde 2160 piksel içermektedir. Yatay ve dikey piksel sayısının iki kata çıkması nedeniyle UHD teknolojisinin sunmuş olduğu piksel sayısı, Full HD teknolojisinin sunmuş olduğu piksel sayısının 4 katıdır.

Son kullanıcıların daha yüksek boyutlara sahip televizyon ve daha yüksek kalitede yayın taleplerine HD görüntü teknolojisi cevap verememiş ve UHD teknolojisinin geliştirilmesi bu noktada başlamıştır. HD teknoloji, pazarda yerini almaya başladığında dünya genelinde ortalama 30" televizyonlar tercih edilirken günümüzde 50" seviyelerine çıkmıştır. Artan televizyon boyutu, daha fazla piksel desteğini zorunlu kılmaktadır.

Son kullanıcılar evlerinde sinema deneyimi yaşayabilmek için pazarda yer almaya başlayan UHD televizyonları tercih etmektedir. Özellikle ilerleyen yıllarda maliyetlerin düşmesi ve UHD televizyon yayınlarının artmasıyla satışların çok ciddi oranda artması beklenmektedir. 2018 yılı itibariyle dünya genelinde 40 milyona yakın UHD televizyonun satılacağı öngörülmektedir. UHD televizyon satışı için tahmin edilen rakamlar Şekil 3.2'de gösterilmektedir.[134]



Şekil 3.2 Gelecek yıllarda dünya genelinde UHD televizyonlar için tahmin edilen satış oranları

UHD teknolojisi, UHD-1 ve UHD-2 olmak üzere iki alt kategoriye ayrılmaktadır. UHD-1 teknolojisi de kendi içerisinde UHD-1 Phase 1 ve UHD-1 Phase 2 olmak üzere iki alt kategoriye ayrılmaktadır. İlgili UHD formatlarına ait özellikler Tablo 3.3'te gösterilmektedir.

[134] Technicolor, *UltraHD: Sooner than expected*, Technicolor White Paper, 2014, s.4. http://www.slideshare.net/TechnicolorCo/white-paper-uhd (16.11.2015)

Tablo 3.3 UHD formatlarına ilişkin teknik özellikler [135]

	UHD-1 Phase 1	UHD-1 Phase 2	UHD-2
Bitiş Tarihi	2015	2018	2020
Çözünürlük	3840×2160	3840×2160	7680×4320
Kare Hızı	50/60	100/120	100/120
Renk Uzayı	Rec. 2020	Rec. 2020	Rec. 2020
Örnekleme Formatı	4:2:0 / 4:2:2	4:2:0 / 4:2:2	4:2:0 / 4:2:2 / 4:4:4
Renk Derinliği	10 bit/s	10 / 12 bit/s	10 / 12 bit/s
Sıkıştırma Teknolojisi	H.265/HEVC Main 10 Profil	H.265/HEVC Main 10 Profil	H.265/HEVC Main 10 Profil

3.1.3.1. UHD/4K İçerikler

4K teknolojisi ile kayıt yapabilen kamera, içeriklerin iletimi sırasında kullanılan yayıncılık (kablo, karasal, uydu) ve internet ortamı, içeriklerin alınmasını sağlayan televizyon vb. gibi bileşenler üzerindeki gelişim tüm hızıyla devam ederken özellikle 4K içerik üretmek için de dünya genelinde çok sayıda yapımcı çalışmalara devam etmektedir. 2012 yılı sonlarına doğru 4K teknolojisi ile oluşturulmuş yaklaşık 150 film ve dizi bulunmakta iken 2013 yılı içerisinde bu rakam yaklaşık 750 olmuştur. Artan talep doğrultusunda yapımcılar içerik üretme noktasında çok hızlı hareket etmektedirler.

İngiltere'de kamu yayıncısı konumundaki BBC (British Broadcasting Corporation), son yıllarda belgesel yayınlarını ve 2013 yılından itibaren Wimbledon Tenis Turnuvası'nı 4K olarak izleyicilere sunmuştur. BBC'nin yanı sıra dünya yayıncılık devi SKY kuruluşu, İngiltere Premier Lig maçlarını; Netflix platformu ise TV dizilerinin büyük çoğunluğunu 4K olarak izleyicilere sunmaktadır.

İçerik üretiminin yanı sıra özellikle Sony, LG, Samsung, Panasonic, Elemental ve Technicolor gibi şirketler 4K yayınların frekans spektrumu üzerinden

[135] Alan Wong, *UHD with AsiaSAT*, AsiaSat Proprietary & Confidential, 2015, s.14.

rahat iletilebilmesi için H.265/HEVC teknolojisinin geliştirilmesi noktasında önemli katkılar vermektedir.

4K teknolojisi, sadece çözünürlüğü artırmayı değil aynı zamanda piksel kalitesi, renk dizisi ve kare hızı gibi parametrelerin de geliştirilmesini amaçlamaktadır.

3.1.3.2. HDR (High Dynamic Range)

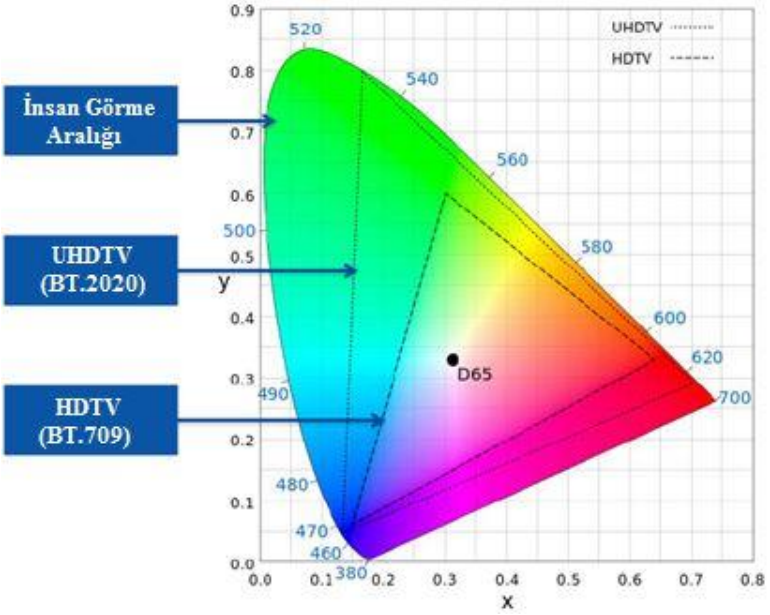
HDR tekniği, farklı odak değerlerinde çekilen fotoğrafların birleştirilerek görüntüye ait farklı parlaklık bölgelerindeki kayıpların azaltılması işlemidir. HDR tekniği ile oluşturulan görüntüler çok daha canlı ve keskindir. HDR tekniğinin yakın gelecekte 4K teknolojisi ile birlikte kullanılması planlanmaktadır. Günümüzde kullanılan 4K teknolojisi birinci nesil olarak adlandırılmakta ve HDR desteği sunmamaktadır.

3.1.3.3. Geniş Renk Dizisi

Geniş renk dizisi, görüntüyü oluşturan renk bölgelerinin genişletilmesidir. 4K teknolojisi ile birlikte gelen bir özellik olup görüntünün daha fazla renk aracılığı ile tanımlamasına imkân sağlamakta ve böylelikle renk derinliğini artırmaktadır.

HD ve Full HD görüntü teknolojileri 8 bit renk derinliği sunmaktadır. 8 bit renk derinliğine ait parametreler ITU-R BT.709 isimli tavsiye dokümanında belirlenmiştir. UHD-1 ve UHD-2 görüntü teknolojileri ise 10 ve 12 bit renk derinliği sunmaktadır. 10 bit renk derinliğine ait parametreler ITU-R BT.2020 isimli tavsiye

dokümanında belirlenmiştir. 8 ve 10 bit renk derinliklerine ait farklılıklar Şekil 3.3'te gösterilmektedir.[136]



Şekil 3.3 BT.709 ve BT.2020 renk standartları

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi BT.2020, BT.709 standardına göre daha geniş bir renk aralığı tanımlamaktadır. Ayrıca, BT.2020 standardı ile insan gözünün sahip olduğu renk derinliğine yakın bir seviyeye ulaşılmıştır.

3.1.3.4. Kare Sayısı

Kare sayısı, televizyon yayınlarında saniyede iletilen görüntü sayısıdır. 4K teknolojisi ile birlikte görüntünün çözünürlük ve keskinliğinin artması neticesinde minimum kare sayısının en az 50 olması gerektiği belirtilmektedir. Kare sayısı, fps parametresi ile ifade edilmektedir.

Sıkıştırılmamış durumdaki 50 fps yayınlar, 30 fps yayınların yaklaşık iki katı iletim kapasitesi harcamaktadır. Ancak, H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda

[136] Christoph Limmer ve Michel Chabrol, *Ultra High Definition Market Outlook and Next Steps*, Eutelsat Technical, 2014, s.13.

60 fps yayınlar, 30 fps yayınlara göre %30 daha fazla iletim kapasitesi harcamaktadır. Aradaki farkın iki kat olmamasının sebebi, daha fazla kare sayısının sıkıştırma verimliliğini artırmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.4'te 60 fps ve 30 fps yayınlar arasındaki farklılık gösterilmektedir.



Şekil 3.4 30 fps ve 60 fps görüntüler arasındaki fark [137]

3.1.4. 8K Görüntü Teknolojisi

8K, 4K teknolojisinin devamı olup özellikle Japonya'nın yapmış olduğu çalışmalar neticesinde geliştirilmiştir. 8K, 4K teknolojisinin yatay ve dikeyde sunmuş olduğu piksel sayısının iki katı piksel içermektedir. (8192×4320) Dolayısıyla, 4K teknolojisinin 4 katı piksel desteği sunmaktadır.

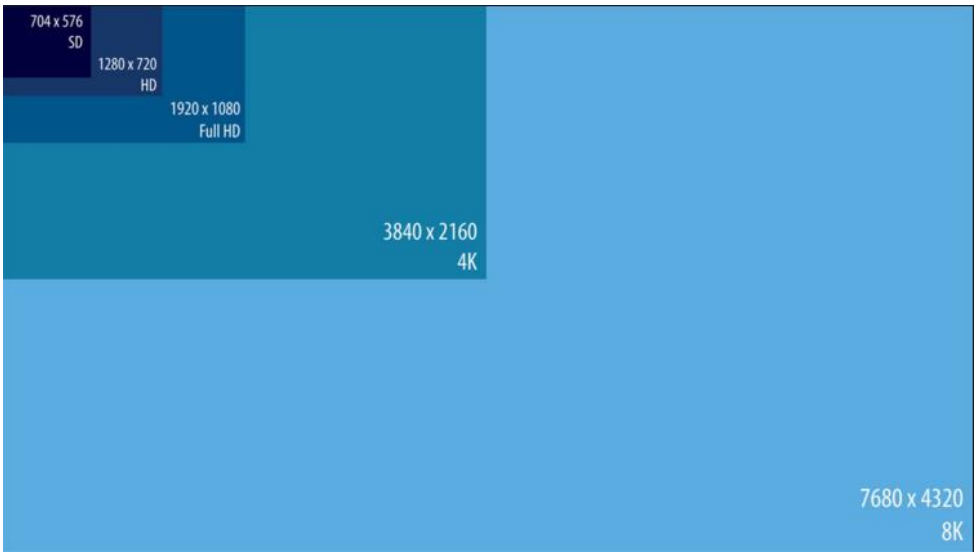
8K teknolojisi, günümüzde özellikle sinema çekim ve gösterimlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. 8K teknolojisinin insan gözü için anlamlı olabilmesi için yayınların çok büyük ekranlarda veya çok yakın mesafelerden izlenmesi gerekmektedir.

2020 yılında 8K teknolojisinin yayıncılıkta kullanılması beklenmektedir. Ayrıca, Japonya'nın kamu yayıncısı konumundaki NHK (Nippon Hōsō Kyōkai) kuruluşu, 2014 NAB (National Association of Broadcasters) Fuarı'nda 8K çözünürlük desteği sunan kamera ve televizyonları tanıtmıştır. Japonya'nın konu ile detaylı olarak ilgilenmesinin sebebi, 2020 yılında Tokyo'da gerçekleştirilecek olan olimpiyatları 8K teknolojisi aracılığıyla tüm dünyaya izletebilme isteğidir.

[137] A.Wong, 2015, s.12.

3.1.5. SD, HD, UHD/4K ve 8K Görüntü Teknolojilerinin Karşılaştırılması

SD teknolojisi, genellikle analog televizyon yayıncılığında kullanılırken HD, Full HD ve 4K teknolojileri sayısal televizyon yayıncılığında kullanılmaktadır. 8K teknolojisi ise günümüzde sadece sinema sektöründe kullanılmakta ancak 2020 yılı itibariyle sayısal yayıncılıkta kullanılması beklenmektedir. İzleyicilerin daha büyük ekranlarda televizyon yayını izleme isteği ve yayın kalitesinin artırılması gibi taleplerinden ötürü görüntü teknolojilerinin gelişimi çok hızlı gerçekleşmektedir. Şekil 3.5'te farklı görüntü teknolojilerine ait piksel değerleri gösterilmektedir.

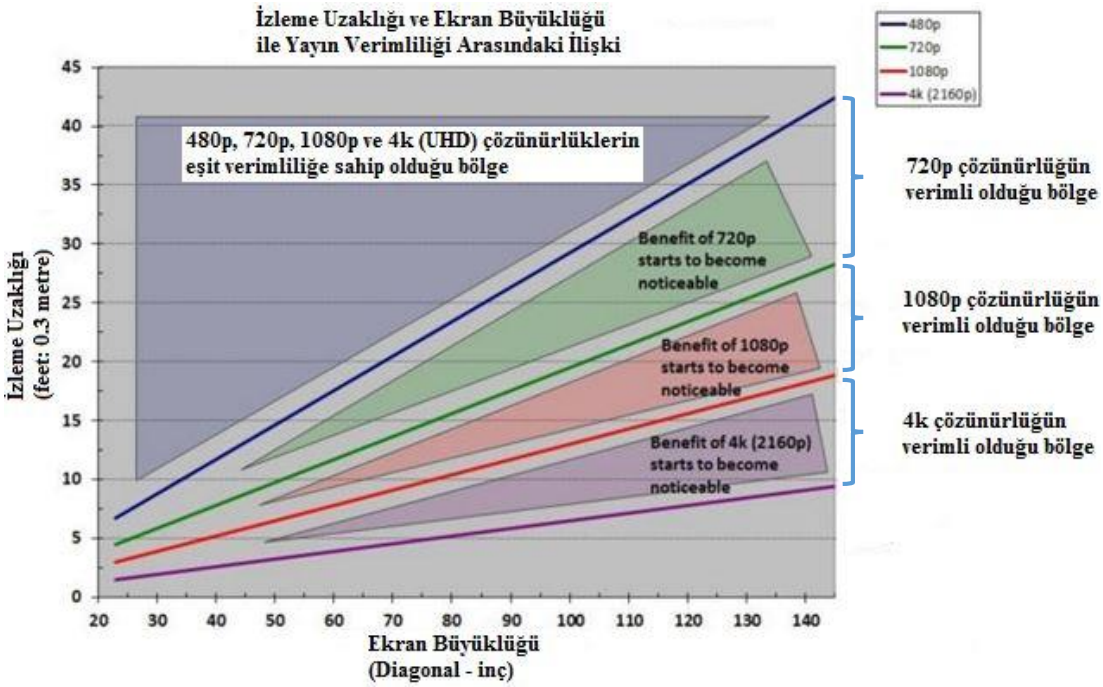


Şekil 3.5 Farklı görüntü teknolojilerine ait piksel değerleri [138]

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi 8K, 4K teknolojisinin; 4K ise Full HD teknolojisinin 4 katı piksel desteği sunmaktadır. Ayrıca 4K, HD 720p teknolojisinin yaklaşık 8 katı piksel desteği sunmaktadır. Piksel fazlalığı, ilgili teknolojiler ile üretilen orijinal yayınlar arasındaki veri boyutu farkının artmasına neden olmaktadır. Ancak sıkıştırılan yayınlar arasındaki veri boyutu farkı, piksek farkı ile aynı orana sahip değildir. Çünkü fazla piksel, sıkıştırma işleminin daha verimli gerçekleşmesini sağlamaktadır. Örnek verilecek olursa, sıkıştırılmamış durumdaki 4K yayınlar HD 720p yayınların 8 katı büyüklükte olmasına rağmen sıkıştırma sonrası aradaki fark 4 kata kadar düşmektedir.

[138] http://technewsrss.com/ultra-hd-and-4k-explained/ (18.11.2015)

Şekil 3.6'da ise 720p, 1080p ve 4K yayınlara ait verimliliğin, televizyon ekranı büyüklüğü ve televizyonun izlendiği mesafeye göre değişimi gösterilmektedir. Özellikle yüksek çözünürlüğe sahip yayınların verimliliği, izleme mesafesinin azaldığı veya ekran boyutunun arttığı durumda ortaya çıkmaktadır. Evlerde televizyon izleme mesafesinin ortalama 3 metre olduğu düşünülürse 70" ve üzeri boyutlara sahip televizyon kullanılması durumunda 4K yayınlardan maksimum verim alınabilmektedir. Bu bağlamda, 4K yayınların ev ortamı için yeterli olduğu 8K yayınların sadece ticari amaçlı uygulamalarda kullanılabileceği belirtilmektedir. Dünya genelinde 8K yayınların ev ortamında izlenmesi yerine 4K yayınlara HDR, yüksek kare sayısı, geniş renk dizisi gibi özelliklerin eklenmesinin daha faydalı olacağı görüşü hâkimdir.



Şekil 3.6 Televizyonu izleme mesafesi ve televizyon büyüklüğünün 720p, 1080p ve 4K yayınların verimliliğine etkisi [139]

[139] http://carltonbale.com/does-4k-resolution-matter/ (05.12.2015)

3.2. H.265/HEVC TEKNOLOJİSİNİN KARASAL VE UYDU ORTAMINDA KULLANILMASI

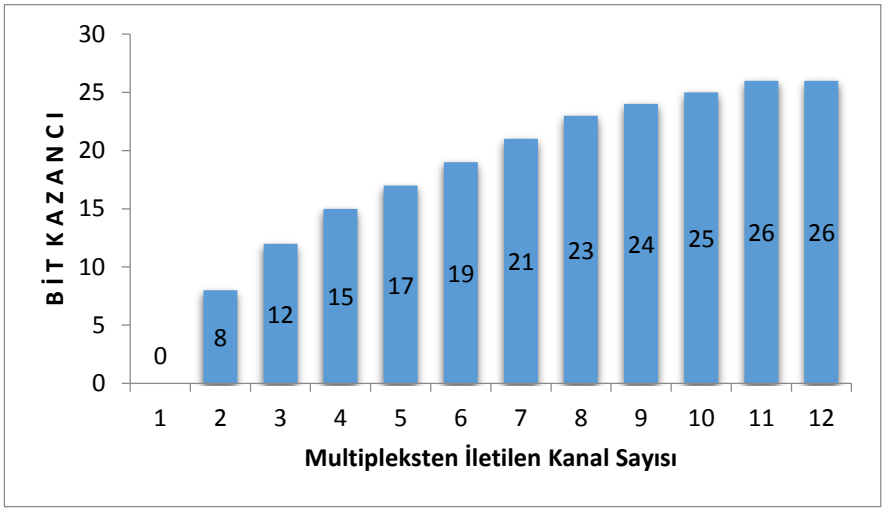
H.265/HEVC, veri boyutunu %50 oranında düşürerek mevcut iletim kapasitesinden daha fazla SD ve HD yayın iletilebilmesine imkân sağlamaktadır. Ayrıca, son yıllarda çeşitli ülkelerde test yayını gerçekleştirilen ve gelecek 5 yıl içerisinde yoğun olarak kullanılması beklenen 4K yayınların iletimi noktasında önemli bir çözüm olarak görülmektedir. Bu bağlamda, H.265/HEVC teknolojisinin uydu ve karasal yayın ortamlarına etkisinin belirlenmesi önem arz etmektedir.

3.2.1. H.265/HEVC ve DVB-T2 Teknolojilerinin Birlikte Kullanımı

Avrupa Yayın Birliği (EBU) tarafından 2016 Mart ayında yayınlanan dokümanda H.265/HEVC teknolojisinin sayısal karasal yayıncılığa etkisinin yanı sıra HD 720p/50, HD 1080p/50, 2160p/50 (UHD-1 Phase -1/UHD-1 Phase-2) yayınların iletimi için gerekli olan bit miktarları ele alınmıştır. Ayrıca, H.265/HEVC teknolojisinin kullanılması durumunda 1 multipleks aracılığı ile iletilebilecek HD ve UHD Phase-1 yayın sayıları belirlenmiştir. İncelemeler, sabit ve istatistiksel multiplexing teknikleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel multiplexing VBR (Variable Bit Rate), sabit multiplexing ise CBR (Constant Bit Rate) olarak adlandırılmaktadır.

İstatistiksel multiplexing (smux), aynı multiplex üzerinde bulunan yayınların değişken bit oranları ile iletilmesini sağlamaktadır. Örnek verilecek olursa bir haber programının iletimi için gerekli olan bit oranı, bir spor müsabakasının iletimi için gerekli olan bit oranından daha düşüktür. Sabit multiplexing işleminin kullanılması durumunda her iki programın iletimi için tanımlanan bit oranı aynı olmaktadır. İstatistiksel multiplexing işleminin kullanılması durumunda ise haber programı daha düşük bit miktarı ile spor müsabakası daha yüksek bit oranı ile iletilebilmektedir. İstatistiksel multiplexing, kapasite kazancı sağlamakta ve iletimin daha verimli

gerçekleşmesini sağlamaktadır. Elde edilen kazanç, iletilen program sayısına bağlı olarak değişmekte ve Şekil 3.7'de gösterilmektedir. İstatistiksel multiplexing işlemi kullanılarak 5 program ve üzerinde yayın iletilmesi durumunda ortalama kapasite kazancı %20 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 3.7 İstatistiksel multiplexing'de iletilen kanal sayısına göre elde edilen kazanç [140]

HD 720p/50, HD 1080p/50, UHD-1 Phase-1 2160p/50 ve UHD-1 Phase-2 2160p/50 yayınların H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojileri kullanılarak iletilebilecekleri bit oranları Tablo 3.4'te gösterilmektedir.[141]

Tablo 3.4 Farklı görüntü formatlarının iletimi için gerekli bit oranları

	H.264/AVC - CBR	**H.265/HEVC - CBR**	**H.265/HEVC - VBR smux ≥ 4**
HD 720p/50	6.0 Mbit/s	3.5 Mbit/s	2.8 Mbit/s
HD 1080p/50	8.4 Mbit/s	4.3 - 4.4 Mbit/s	3.6 - 3.8 Mbit/s
UHD-1 Phase-1 2160p/50	●	10.4 - 14.8 Mbit/s	9.25 - 12.0 Mbit/s
UHD-1 Phase-2 2160p/50	●	22.5 Mbit/s	20.7 Mbit/s

UHD-1 Phase-2 yayınlar HDR, HFR ve geniş renk dizisi gibi özellikleri içerirken UHD-1 Phase-1 yayınlar içermemektedir. Dolayısıyla UHD-1 Phase-1

[140] European Broadcasting Union, *An Introduction to Time-Frequency Slicing*, EBU Technical Report, Cenevre, 2016, s.16.
[141] European Broadcasting Union, *TV Programme Accommodation in a DVB-T2 Multiplex For (U)HDTV with HEVC Video Coding*, EBU Technical Report, Cenevre, 2016, s.8-11.

yayınların iletimi için gerekli olan bit oranı UHD-1 Phase-2 yayınlara göre daha düşüktür.

EBU tarafından gerçekleştirilen testte, H.265/HEVC kullanılarak sıkıştırılan yayınların H.264/AVC kullanılarak sıkıştırılan yayınlara göre %42 daha az iletim kapasitesi kullandığı ve ilgili oranın 5 yıl içerisinde %60 seviyelerine çıkacağı belirtilmiştir.

DVB-T2 teknolojisi aracılığıyla elde edilen iletim kapasitesi alış tipi, kodlama oranı, iletim modu, modülasyon tipi, güvenlik aralığı ve pilot paterni gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. İlgili iletim kapasitelerinden H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda iletilebilecek Full HD, UHD-1 Phase-1 ve UHD-1 Phase-2 yayın sayıları Tablo 3.5 ve 3.6'da gösterilmektedir.[142] [143]

Tablo 3.5 Sabit yayın alış tipinin kullanılması durumunda iletilebilecek HD, UHD-1 Phase-1 ve UHD-1 Phase-2 yayın sayısı

Değişken Parametreler	Sabit Yayın Alış Tipi (Normal Mod)	Sabit Yayın Alış Tipi (Maksimum Kapsama Alanı)	Sabit Yayın Alış Tipi (Sınırlı Kapsama Alanı)	Sabit Yayın Alış Tipi (Geniş Kapsama Alanı)
Bant Genişliği	8 MHz	8 MHz	8 MHz	8 MHz
FFT Modu	32k	32k	32k	32k
Taşıyıcı Modu	Extended	Extended	Extended	Extended
Pilot Paterni	PP7	PP2	PP4	PP2
Güvenlik Aralığı	1/128 (28 µs)	1/8 (448 µs)	1/16 (224 µs)	1/8 (448 µs)
Modülasyon	256 QAM	16 QAM	256 QAM	256 QAM
Kodlama Oranı	2/3	2/3	2/3	2/3
C/N	20.0 dB	11.6 dB	20.8 dB	21.2 dB
Bit Oranı	40.2 Mbit/s	16.7 Mbit/s	37.0 Mbit/s	33.4 Mbit/s
HDTV 1080p/50 (Program Sayısı)	11.4 - 11.7	4.3 - 4.4	10.4 - 10.8	9.5 - 9.7
UHDTV 2160p/50 UHD-1 Phase-1 (Program Sayısı)	2.9 - 4.5	1.1 - 1.6	2.7 - 4.2	2.4 - 3.6
UHDTV 2160p/50 UHD-1 Phase-2 (Program Sayısı)	1.8	0	1.6	1.5

[142] a.g.k., s.12.
[143] a.g.k., s.12.

DVB-T2 teknolojisinin sabit yayın alış tipi için kullanılması durumunda maksimum iletim kapasitesi 40.2 Mbit/s, minimum iletim kapasitesi 16.7 Mbit/s olarak elde edilmektedir. İlgili iletim kapasitelerinden H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda 4 - 12 aralığında Full HD yayın, 1 - 4 aralığında UHD-1 Phase-1 yayın ve 1 - 2 aralığında UHD-1 Phase-2 yayın iletilmektedir.

Tablo 3.6 Taşınabilir ve mobil yayın alış tiplerinin kullanılması durumunda iletilebilecek HD, UHD-1 Phase-1 ve UHD-1 Phase-2 yayın sayısı

Değişken Parametreler	**Taşınabilir Yayın Alış Tipi Maksimum Bit Oranı**	**Taşınabilir Yayın Alış Tipi Maksimum Bit Oranı (Alternatif)**	**Taşınabilir Yayın Alış Tipi (Maksimum Kapsama Alanı)**	**Taşınabilir Yayın Alış Tipi (Optimum Spektrum Kullanımı)**	**Taşınabilir ve Mobil Yayın Alış Tipi (Farklı Servisler Tarafından MUX'un Ortak Kullanılması) Yüksek & Düşük Bit Oranı**	
Bant Genişliği	8 MHz	8 MHz	8 MHz	8 MHz	8 MHz	
FFT Modu	16k	32k	16k	16k	8k	
Taşıyıcı Modu	Extended	Extended	Extended	Extended	Extended	
Pilot Paterni	PP3	PP4	PP3	PP1	PP1	
Güvenlik Aralığı	1/8(224 µs)	1/16(224 µs)	1/8(224 µs)	1/4(448 µs)	1/4 (224 µs)	
Modülasyon	64 QAM	64 QAM	16 QAM	64 QAM	64 QAM	16 QAM
Kodlama Oranı	2/3	2/3	1/2	2/3	2/3	1/2
C/N	17.9 dB	17.9 dB	9.8 dB	18.3 dB	18.3	10.2
Bit Oranı	26.2 Mbit/s	27.7 Mbit/s	13.1 Mbit/s	22.6 Mbit/s	22.4 Mbit/s	11.2 Mbit/s
HDTV 1080p/50 (Pr. Sayısı)	7.1 - 7.3	7.5 - 7.8	3.3 - 3.4	6.0 - 6.2	6.0 - 6.2	2.7 - 2.8
UHDTV 2160p/50 UHD-1 Phase-1 (Pr. Sayısı)	1.8 - 2.7	1.9 - 3.0	0.9 - 1.3	1.5 - 2.4	1.5 - 2.3	0.8 - 1.1
UHDTV 2160p/50 UHD-1 Phase-2 (Pr. Sayısı)	1.2	1.2	0.6	1.0	1.0	0.5

DVB-T2 teknolojisine taşınabilir-mobil yayın alış tipi için kullanılması durumunda maksimum iletim kapasitesi 27.7 Mbit/s, minimum iletim kapasitesi 16.7 Mbit/s olarak elde edilmektedir. İlgili iletim kapasitelerinden H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda 3 - 7 aralığında Full HD yayın, 1 - 3 aralığında UHD-1 Phase-1 yayın ve 0 - 1 aralığında UHD-1 Phase-2 yayın iletilmektedir.

Frekans spektrumu sınırlı kapasiteye sahip milli bir kaynaktır. Bu yüzden, etkin ve verimli bir şekilde planlanması oldukça önemlidir. Frekans spektrumunun hem ülkeler hem de servisler arasında paylaşımı ve kullanım koşulları, 3 - 4 yılda bir düzenlenen Dünya Radyokomüniskasyon Konferansının (WRC) en çok tartışılan konuları arasındadır.

Frekans spektrumunun verimli kullanılması amacıyla Karasal Sayısal Televizyon (DVB-T2) Ulusal Frekans Planı, 15 Mayıs-16 Haziran 2006 tarihleri arasında Cenevre/İsviçre'de gerçekleştirilen Bölgesel Radyokomüniskasyon Konferansı'nda belirlenen alan tahsisleri (allotment) ve nokta tahsisleri (assignment) temel alınarak Radyo ve Televizyon Üst Kurulu tarafından ülkemiz için hazırlanmıştır.

Karasal Sayısal Televizyon Ulusal Frekans Planı, frekans spektrumunda VHF Band III (174 - 230 MHz) ve UHF VI/V (470 - 790 MHz) bantlarında olmak üzere RRC (Regional Radiocommunication Conference) 2006 Konferansında televizyon yayınları için ayrılmış olan 5 - 10. kanallar (VHF) ile 21 - 60. kanallar (UHF) kullanılarak oluşturulmuştur.

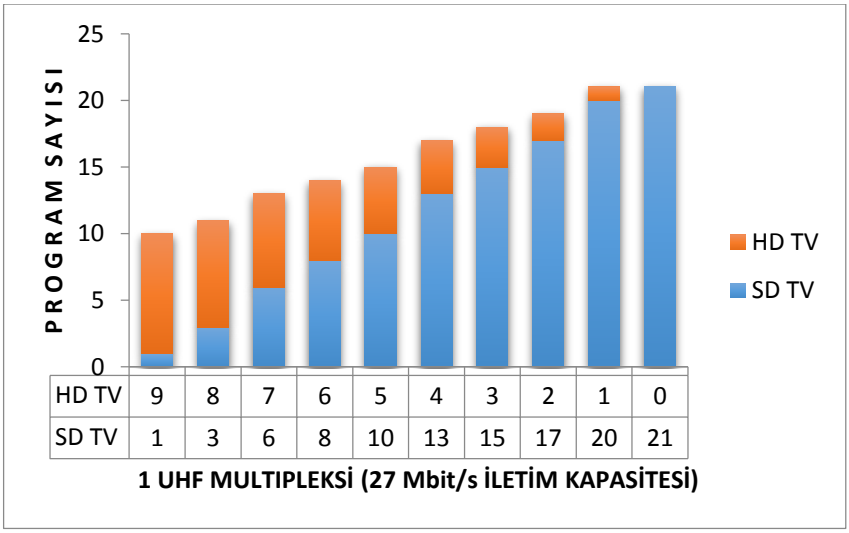
Ülkemizde karasal sayısal televizyon yayıncılığı için DVB - T2 teknolojisi tercih edilmiş ve aşağıda sıralanan parametreler doğrultusunda Türkiye Karasal Sayısal Televizyon Ulusal Frekans Planı hazırlanmıştır. Söz konusu frekans planı kapsamında DVB-T2 teknolojisine yönelik seçilen parametreler ve özellikleri aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.[144]

[144] RTÜK, *Türkiye Karasal Sayısal Televizyon (DVB-T2) Ulusal Frekans Planı*, Radyo ve Televizyon Üst Kurulu, 2012, s.4-5.

- Alış Tipi: Sabit, mobil ve taşınabilir olmak üzere üç farklı yayın alış tipi RRC Konferansı'nda alınan kararlara göre tanımlanmıştır. Ayrıca, taşınabilir yayın alış tipi de bina içi ve bina dışı olmak üzere kendi içerisinde ikiye ayrılmaktadır. Bu bağlamda, 16 büyükşehir il merkezinde taşınabilir bina içi alış (PI) ve diğer yerleşim yerleri için taşınabilir bina dışı alış (PO) tipi tercih edilmiştir.
- İletim Modu: Hem yüksek veri hızı hem de SFN tekniğinin verimli bir şekilde çalışabilmesine olanak sağladığı için 32k iletim modu tercih edilmiştir.
- Güvenlik Aralığı: Güvenlik aralığı, SFN tekniğinin kullanılması durumunda farklı alanlardaki iki vericiden gönderilen aynı yayınların alıcıya ulaştıkları süre arasındaki farktır. Güvenlik aralığı arttıkça gönderilen veri miktarı azalmakta, azaldıkça gönderilen veri miktarı artmaktadır. Güvenlik aralığı süreleri 1/128, 1/32, 1/16, 19/256, 1/8, 19/128, 1/4 oranlarında olup dünya genelinde yaygın olarak 1/16 ve 19/256 kullanılmaktadır. Geniş SFN yapısına ve daha fazla veri taşımaya imkân verdiği için güvenlik aralığı 19/256 olarak tercih edilmiştir.
- Kodlama Oranı: 5/6, 4/5, 3/4, 3/5, 2/3, 1/2 olmak üzere altı farklı koruma oranı bulunmaktadır. Koruma oranının 1/2 olması durumda en iyi koruma sağlanırken en düşük seviyede veri iletilebilmekte, 5/6 olması durumunda ise en düşük koruma sağlanırken en yüksek seviyede veri iletilebilmektedir. Ülkemiz coğrafyasının özellikleri ve verici güçleri dikkate alınarak kodlama oranı 2/3 olarak tercih edilmiştir.
- Modülasyon Tipi: 16-QAM, 64-QAM ve 256-QAM olmak üzere 3 farklı modülasyon tipi bulunmaktadır. Taşınabilir bina içi ve bina dışı alışa uygun olması ve 256-QAM tekniğine oranla daha az verici gücü gerektirmesi nedeniyle 64-QAM modülasyon tipi tercih edilmiştir.
- Pilot Paterni: Pilot paterni, DVB - T2 teknolojisinde 8 farklı değer alabilmektedir. Pilot sinyalleri kanal eşitlemesi, kanal tahmini ve yayın sinyallerinin uyumlu iletilmesi gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Semboller arası enterferans ve bina dışı taşınabilir alışa uygun olması nedeniyle pilot paterni olarak PP4 tercih edilmiştir.

DVB - T2 teknolojisi için belirlenen parametreler doğrultusunda kanal iletim kapasitesi 27 Mbit/s olmaktadır. Parametrelerin farklı seçilmesi durumunda iletim kapasitesi artıp azalabilmektedir.

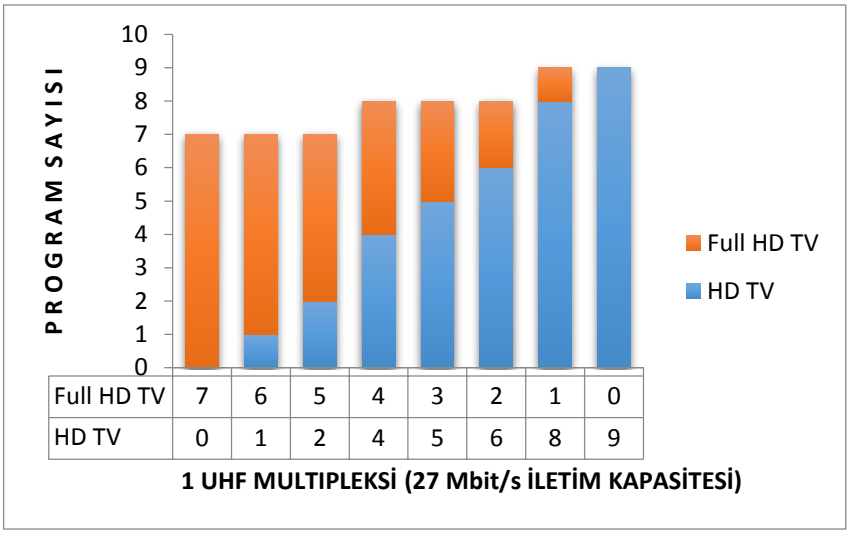
Planlama yapılırken H.265/HEVC teknolojisinin standart haline gelmemesi nedeniyle iletilebilecek kanal sayıları H.264/AVC teknolojisine göre belirlenmiştir. H.264/AVC kullanılması durumda, 1 UHF multipleksinden 27 Mbit/s iletim kapasitesi aracılığıyla 3 yüksek çözünürlüklü (HD) ve 2 standart çözünürlüklü (SD) program veya 11 SD program iletilebilmektedir.[145] H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda 27 Mbit/s iletim kapasitesi aracılığıyla 9 HD 720p/50, 7 Full HD 1080p/50, 21 SD, 1 - 3 aralığında UHD-1 Phase-1 2160p/50 veya 0 - 1 aralığında UHD-1 Phase-2 2160p/50 yayın iletilebilecektir. Bu bağlamda, UHD (4K) yayınların yüksek iletim kapasitesi gereksinimi sayısal karasal televizyon yayıncılığında kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Şekil 3.8'de 27 Mbit/s iletim kapasitesi aracılığıyla farklı oranlarda iletilebilecek SD ve HD yayın sayıları gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 3.9'da 27 Mbit/s iletim kapasitesi aracılığıyla farklı oranlarda iletilebilecek HD ve Full HD yayına sayıları gösterilmektedir. Hesaplamalar, Avrupa Yayın Birliği (EBU) tarafından SD, HD ve Full HD yayınların iletimi için belirlenen bit oranları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



HD TV	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SD TV	1	3	6	8	10	13	15	17	20	21

Şekil 3.8 27 Mbit/s iletim kapasitesi aracılığıyla iletilebilecek SD ve HD yayın sayıları

[145] RTÜK, 2012, s.5.



Şekil 3.9 27 Mbit/s iletim kapasitesi aracılığıyla iletilebilecek HD ve Full HD yayın sayıları

Türkiye Karasal Sayısal Televizyon (DVB-T2) Ulusal Frekans Planı, 7 UHF multipleksi kullanılarak hazırlanmıştır. 2 - 27 Kasım 2015 tarihinde gerçekleştirilen WRC toplantısına, ülkemizden RTÜK, BTK (Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu) ve birçok kuruluş katılım sağlamıştır. Toplantıda 470 - 790 MHz frekans bandıyla ilgili RTÜK'ü ilgilendiren kararlar alınmıştır. Resolution COM 4/4 Çözüm Kararı ile ülkemizin de içinde yer aldığı 1.Bölge (Region 1) için 694 - 790 MHz frekans bandının IMT (International Mobile Telecommunications) servislerine birinci öncelikli tahsisi için karar verilmiştir. Bu yüzden, hâlihazırda Karasal Sayısal Televizyon Ulusal Frekans Planı'nda yer alan 49 - 60. kanallar arasının frekans planından çıkarılarak yeni durum için güncelleştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, RTÜK tarafından 6 UHF multipleksinin kullanılabilmesine yönelik planlama çalışmaları devam etmektedir.

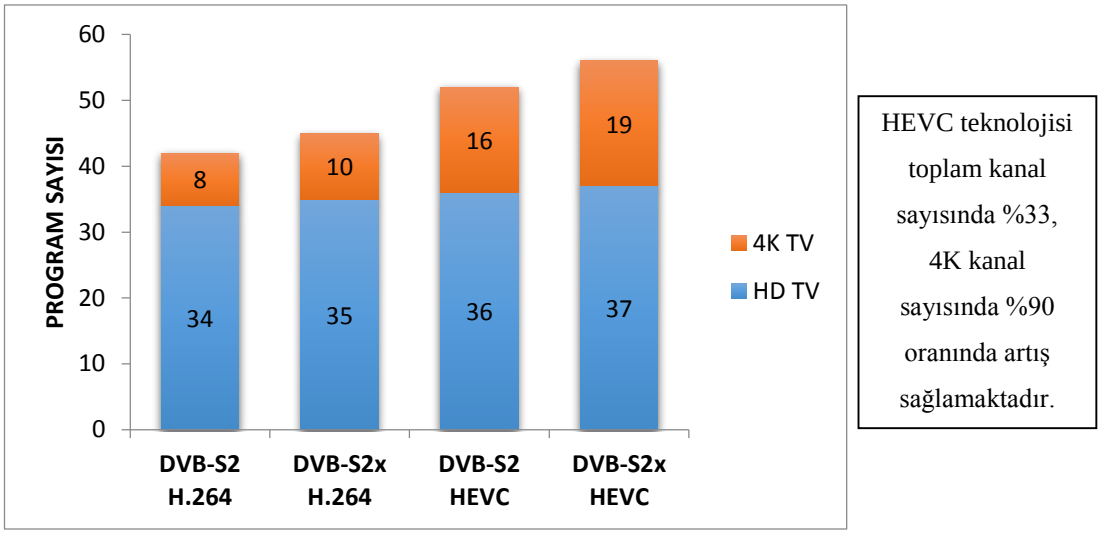
Şekil 3.8 ve 3.9'da H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda bir UHF multipleks aracılığıyla iletilebilecek SD - HD ve HD - Full HD yayın sayıları gösterilmektedir. İlgili değerlerin 6 UHF multipleksine uyarlanması sonucu iletilebilecek SD - HD ve HD - Full HD yayın sayılarına ait farklı varyasyonlar Ek-2 ve Ek-3'te detaylı olarak gösterilmektedir.

3.2.2. H.265/HEVC ve DVB-S2 Teknolojilerinin Birlikte Kullanımı

Sayısal uydu yayıncılığı, sayısal karasal yayıncılığa göre daha geniş bir bant aralığı kullandığı için artan HD yayınları iletme noktasında çok önemli bir konumdadır. Son yıllarda yaygınlaşan ve yüksek iletim oranına sahip 4K yayınlar H.265/HEVC ile sıkıştırıldıktan sonra sayısal uydu yayıncılığı aracılığıyla izleyicilere ulaşmaktadır. H.265/HEVC teknolojisinin yanı sıra 2014 yılında geliştirilen DVB-S2 standardı da sayısal uydu yayıncılığının verimliliğini artırma noktasında gelecekte önemli bir çözüm olarak kullanılacaktır.

H.265/HEVC ve DVB-S2 teknolojilerinin sayısal uydu yayıncılığına etkisini belirlemek amacıyla Hispasat (İspanyol Uydu Haberleşme Operatörü), IHS, EutelSAT (European Telecommunications Satellite Organization) ve AsiaSAT (Asya Uydu Telekomünikasyon Limited Şirketi) kuruluşları tarafından çeşitli çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Hispasat, DVB-S2 teknolojisinin kullanıldığı ve 8 transponder'dan oluşan Amazon uydusu üzerinden H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda iletilebilecek HD ve 4K yayın sayılarının karşılaştırılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ayrıca, DVB-S2x teknolojisinin kullanılması durumunda iletilebilecek yayın sayıları da değerlendirilmiştir. İlgili çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar, Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan HD ve 4K yayınların DVB-S2 ve DVB-S2x teknolojileri aracılığıyla iletilmesi [146]

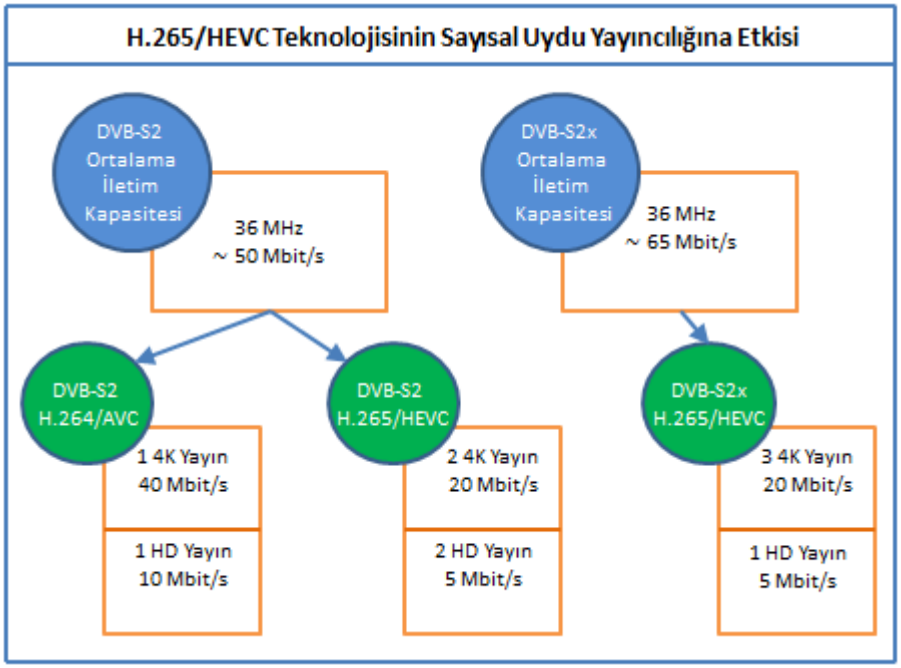
Şekil 3.10 incelendiğinde;

- DVB-S2 ve H.264/AVC teknolojilerinin birlikte kullanılması durumda 34 adet HD ve 8 adet 4K yayın,
- DVB-S2x ve H.264/AVC teknolojilerinin birlikte kullanılması durumda 35 adet HD ve 10 adet 4K yayın,
- DVB-S2 ve H.265/HEVC teknolojilerinin birlikte kullanılması durumunda 36 adet HD ve 16 adet 4K yayın,
- DVB-S2x ve H.265/HEVC teknolojilerinin birlikte kullanılması durumunda 36 adet HD ve adet 16 4K yayın,

iletilebilmektedir. Ayrıca, H.265/HEVC ile iletilen yüksek çözünürlüklü yayınların (HD + 4K) %33 oranında artış gösterdiği görülmektedir.

Hispasat'ın yanı sıra IHS kuruluşu da 1 adet transponder üzerinden H.264/AVC veya H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda iletilebilecek 4K (UHD-1 Phase-2) yayın sayısı ile ilgili olarak karşılaştırma gerçekleştirmiştir. İlgili çalışmaya ilişkin sonuçlar, Şekil 3.11'de gösterilmektedir.

[146] Hispasat, *DVB-EBU UHDTV Fact Findings*, 2013.



Şekil 3.11 H.264/AVC veya H.265/HEVC ile sıkıştırılan 4K yayınların DVB-S2 ve DVB-S2x teknolojileri aracılığıyla iletilmesi [147]

- DVB-S2 ve H.264/AVC aracılığıyla bir transponder üzerinden 1 adet 4K (40 Mbit/s) ve 1 adet HD (10 Mbit/s) yayın iletilebilmektedir.
- DVB-S2 ve H.265/HEVC aracılığıyla bir transponder üzerinden 2 adet 4K (40 Mbit/s) ve 2 adet HD (10 Mbit/s) yayın iletilebilmektedir.
- DVB-S2x ve H.265/HEVC aracılığıyla bir transponder üzerinden 3 adet 4K (60 Mbit/s) ve 1 adet HD (5Mbit/s) yayın iletilebilmektedir.

H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojilerinin sayısal uydu yayıncılığında kullanılması durumunda 1080/25i, 1080/50p, 2160/25p ve 2160/50p yayınların iletimi için gerekli olan bit oranları ve bir transponder üzerinden iletilebilecek yayın sayıları EutelSAT kuruluşu tarafından da incelenmiştir. İnceleme kapsamında kullanılan transponder, 36 MHz bant genişliğe ve 60 Mbit/s iletim kapasitesine sahiptir. İlgili inceleme sonucu oluşan değerler Tablo 3.7'de gösterilmektedir.

[147] Tom Morrod ve Ed Border, *TV Technology and TV Systems: Intelligence Services*, IHS Electronics&Media, 2013, s.12.

Tablo 3.7 1080/25i, 1080/50p, 2160/25p ve 2160/50p yayınların sayısal uydu yayıncılığı üzerinden iletimi için gerekli olan bit oranları [148]

Görüntü Formatı	H.264/AVC	İletilebilecek Yayın Sayısı	H.265/HEVC	İletilebilecek Yayın Sayısı
1080/25i	~7 - 8 Mbit/s	8	~ 4 Mbit/s	15
1080/50p	~ 10 Mbit/s	6	~ 5 Mbit/s	12
2160/25p	~15 - 20 Mbit/s	4	~ 7 - 10 Mbit/s	8
2160/50p	~26 - 40 Mbit/s	2	~13 - 20 Mbit/s	4

Tablo 3.7 incelendiğinde H.265/HEVC ile sayısal uydu yayıncılığı aracılığı ile iletilebilecek HD ve 4K yayın sayısının yaklaşık iki katına çıktığı görülmektedir.

AsiaSAT kuruluşu, farklı sayısal uydu yayıncılığı teknolojilerine (DVB-S, DVB-S2 ve DVB-S2x) ait sembol oranı, modülasyon tipi (QPSK: Quadrature Phase Shift Keying ve APSK: Amplitude and Phase - Shift Keying) ve FEC (Forward Error Correction) oranı gibi parametreleri değiştirerek çeşitli iletim kapasiteleri elde etmiştir. İlgili iletim kapasiteleri üzerinden H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojileri ile sıkıştırılmaları durumunda iletilebilecek SD, HD ve 4K yayın sayılarını belirlemiştir. İnceleme sonuçları, Tablo 3.8'de gösterilmektedir.

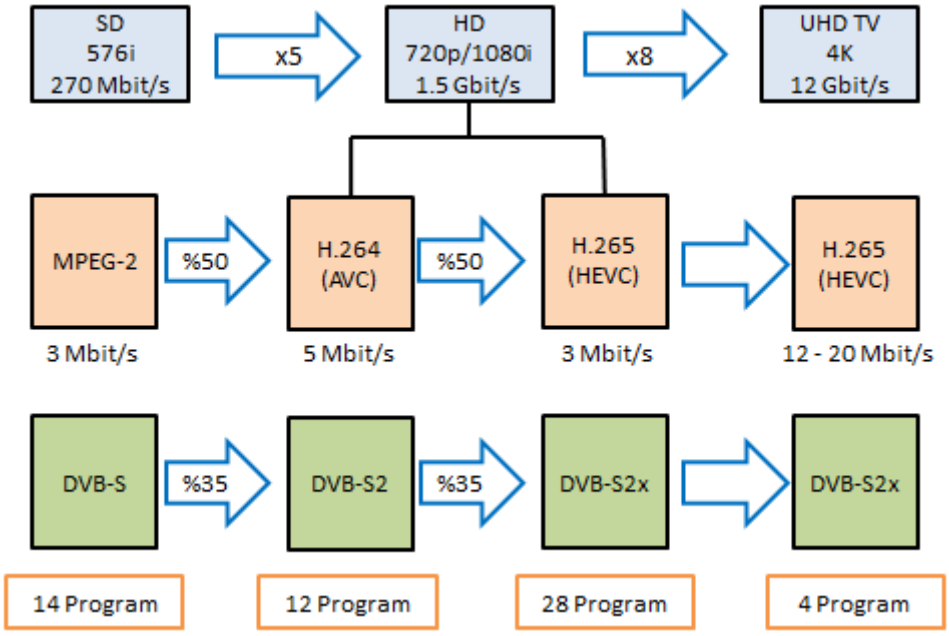
Tablo 3.8 H.264/AVC ve H.265/HEVC ile sıkıştırılan SD, HD ve 4K yayınların DVB-S, DVB-S2 ve DVB-S2x teknolojileri aracılığıyla iletilmesi

İletim Teknolojisi	İletim Kapasitesi	SD (25p/30p) Yayın Sayısı	HD (25p/30p) Yayın Sayısı	4K 50p/60p Yayın Sayısı
DVB-S QPSK FEC: 3/4	38 Mbit/s	7 - 12 (MPEG-2)	4 - 5 (H.264)	-
DVB-S 8PSK FEC: 5/6	72 Mbit/s	24+ (H.264)	7 - 9 (H.264) 14 - 18 (H.265)	1 - 2 (H.264) 3 - 5 (H.265)
DVB-S2 16APSK FEC: 2/3	79 Mbit/s	-	7 - 9 (H.264) 15 - 19 (H.265)	1 - 3 (H.264) 3 - 6 (H.265)
DVB-S2x 16APSK FEC: 114/180	83 Mbit/s	-	8 - 10 (H.264) 16 - 20 (H.265)	2 - 3 (H.264) 4 - 6 (H.265)
DVB-S2x 16APSK FEC: 135/180	99 Mbit/s	-	9 - 12 (H.264) 19 - 24 (H.265)	2 - 3 (H.264) 5 - 7 (H.265)

[148] C. Limmer ve M. Chabrol, 2014, s.21.

Farklı kuruluşların yapmış olduğu çalışmalar göstermektedir ki H.265/HEVC teknolojisinin sayısal uydu yayıncılığında kullanılması durumunda mevcut durumda iletilen kanal sayısı, yaklaşık olarak iki katına çıkacaktır. Gerçekleştirilen çalışmalarda iletilebilecek kanal sayıları arasındaki farklılık, **H.265/HEVC teknolojisinin 2013 - 2016 yılları arasında ciddi bir gelişim göstererek sıkıştırma kazancını %37 seviyelerinden %50 seviyelerine çıkarmış olmasından kaynaklanmaktadır.**

Geçmişten günümüze geliştirilen görüntü teknolojileri SD (576i), HD (720p / 1080i) ve 4K (2160p); sıkıştırma teknolojileri MPEG-2, H.264/AVC ve H.265/HEVC; sayısal uydu yayıncılığı teknolojileri DVB-S, DVB-S2 ve DVB-S2x olarak sıralanabilir. Bu kapsamda, ilgili teknolojilerin birlikte kullanımı neticesinde sayısal uydu yayıncılığındaki süreç ve iletilebilecek program sayıları Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Görüntü, sıkıştırma ve yayıncılık teknolojilerinin birlikte kullanımı [149]

[149] Simon Pryor, *Migration Strategies for S2 Extension, HEVC&UHDTV*, Newtec White Paper, 2013, s.5. http://www.newtec.eu/frontend/files/userfiles/files/Whitepaper%20strategies%20for%20DVB-S2%20extensions%20HEVC%20UHDTV%20Rev2.pdf (09.02.2016)

Şekil 3.12 incelendiğinde sayısal uydu yayıncılığın geçmişteki durumu ve geleceğine ilişkin olarak çıkarılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- 4K yayınların veri boyutu, HD yayınların veri boyutunun 8 katı iken HD yayınların veri boyutu SD yayınların veri boyutunun 5 katıdır.
- H.265/HEVC ile sıkıştırılan yayınlar, H.264/AVC ile sıkıştırılan yayınlara göre %50 daha az veri boyutu ile ifade edilmektedir. H.264/AVC ve MPEG-2 teknolojileri arasındaki fark aynı şekildedir.
- DVB-S2x, DVB-S2 teknolojisine göre %35 daha fazla iletim kapasitesi imkânı sunmaktadır. DVB-S2 ve DVB-S teknolojileri arasındaki fark aynı şekilde %35 seviyelerindedir. DVB-S2x teknolojisi, 2014 yılında geliştirilmiş ve henüz standart haline gelmemiştir.
- DVB-S teknolojisi, ortalama 45 Mbit/s iletim kapasitesi sunmaktadır. SD yayınların MPEG-2 ile sıkıştırılması durumunda 45 Mbit/s'lık iletim kapasitesi aracılığıyla 14 program iletilebilmektedir.
- DVB-S2 teknolojisi, ortalama 60 Mbit/s iletim kapasitesi sunmaktadır. HD yayınların H.264/AVC ile sıkıştırılması durumunda 60 Mbit/s'lık iletim kapasitesi aracılığıyla 12 program, H.265/HEVC ile sıkıştırılması durumunda 20 program iletilebilmektedir.
- DVB-S2x teknolojisi, ortalama 84 Mbit/s iletim kapasitesi sunmaktadır. HD yayınların H.265/HEVC ile sıkıştırılması durumunda 84 Mbit/s'lık iletim kapasitesi aracılığıyla 28 program iletilebilmektedir. 4K yayınların H.265/HEVC ile sıkıştırılması durumunda 84 Mbit/s'lık iletim kapasitesi aracılığıyla 4 program iletilebilmektedir. Ancak, H.265/HEVC teknolojisinin gelecek 5 yıl içerisinde artan sıkıştırma verimliliği ile iletilen program sayısını 6'ya çıkarması beklenmektedir.

2014 yılında geliştirilen DVB-S2x yayın teknolojisi henüz standart haline getirilmemiştir. DVB-S2x teknolojisinin standart haline gelmesi ve yaygınlaşmasının sayısal uydu yayıncılığı için çok önemli bir adım olacağı değerlendirilmektedir. H.265/HEVC ve DVB-S2x teknolojilerinin birlikte kullanılması durumunda sayısal

uydu yayıncılığında iletim kapasitesi ciddi oranda artacak ve bu durum, sayısal uydu yayıncılığı aracılığıyla iletilen HD ve 4K yayınların artmasını sağlayacaktır.

3.3. DÜNYA GENELİNDE GERÇEKLEŞTİRİLEN UYGULAMALAR

4K görüntü yakalayabilen kameralar, 2006 yılından itibaren Panasonic, Sony ve Canon gibi üreticilerin çalışmalarıyla geliştirilmiştir. 4K görüntülerin kaydedilmesinin ardından sayısal yayıncılıkta kullanılabilmesine yönelik çalışmalar başlamıştır. Ancak 2010 yılında yayıncılık sektörüne tam anlamıyla yerleşen ve o dönem itibariyle en gelişmiş video sıkıştırma teknolojisi olan H.264/AVC, 4K yayınların sıkıştırılması noktasında yetersiz kalmış ve H.265/HEVC geliştirilmiştir. H.265/HEVC teknolojisinin geliştirilmesiyle dünya genelinde 4K yayıncılığa duyulan ilgi artmaya başlamıştır. Bu kapsamda Güney Kore, Japonya, İspanya, Fransa ve Türkiye tarafından iletilen 4K yayınlar izleyicilerle buluşmuştur.

H.265/HEVC ile video sıkıştırma işlemleri 2012-2013 yılları arasında yazılım tabanlı gerçekleştirilebildiği için sıkıştırma işlemi çok uzun sürmüştür. Örnek verilecek olursa 4K çözünürlüğündeki 1 dakikalık video verisi, yazılım tabanlı H.265/HEVC kodlayıcılar kullanılarak bir günde sıkıştırılabilmiştir. Bu nedenle, iletilen ilk 4K yayınlar canlı olarak değil bant kayıtları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ancak ilerleyen süreçte yazılım tabanlı ürünlerin gelişmesi ve donanım tabanlı ürünlerin de pazarda yer almaya başlamasıyla H.265/HEVC teknolojisi, canlı olarak video sıkıştırma işlemi yapabilecek seviyeye gelmiştir. Bu gelişmeyle birlikte, 2014 yılından itibaren 4K yayınlar, canlı olarak iletilebilme imkânına kavuşmuştur.

Ülke değerlendirmeleri detaylı olarak ele alınmadan önce 2006 yılından itibaren 4K yayıncılık ve H.265/HEVC ile ilgili dünya genelinde yaşanan gelişmelerin belirtilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda, ilgili gelişmeler aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- 2006 yılı Kasım ayında Japonya'nın kamu yayıncısı konumunda bulunan NHK kuruluşu, fiber optik kablolar aracılığıyla canlı olarak kaydedilen 4K yayınları, 260 kilometre uzaklığa iletmiştir. İletim, 16 farklı dalga boyunda 24 Gbit/s hız elde edilerek gerçekleştirilmiştir.[150]
- 2007 yılında SMPTE organizasyonu, UHD TV için 2036 ismiyle bir standart yayınlamıştır. İlgili standarda göre UHD TV, UHD TV-1 (3840×2160 veya 4K) ve UHD TV-2 (7680x4320 veya 8K) olmak üzere iki farklı kategoriye ayrılmıştır.[151]
- 2008 yılında Aptina Imaging şirketi, 4K görüntü yakalayabilmek için yeni bir CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) sensörü geliştirmiştir. Yine aynı yıl IBC (International Broadcasting Conference) konferansında Sony, Samsung, Panasonic, Sharp ve Toshiba şirketleri de 4K teknolojisi için yeni CMOS sensörü tasarladıklarını açıklamıştır.
- 2011 yılı Mayıs ayında Sharp ve NHK kuruluşlarının işbirliği neticesinde 7680x4320 çözünürlüğünde, 85" büyüklüğünde ve 10 bit renk desteği sunan dünyanın ilk 8K televizyonu üretilmiştir.[152]
- 2012 yılı Nisan ayında, Güney Kore'nin 4 büyük sayısal karasal TV yayıncısı (KBS, MBC, SBS ve EBS) gelecekte UHD TV deneme yayını yapacaklarını açıklamıştır. Bu açıklama doğrultusunda 4K deneme yayınları gerçekleştirilmiş ve çalışmalara önemli TV üreticilerinden LG ve Samsung şirketleri de katılmıştır.[153]
- 2012 yılında Londra'da gerçekleştirilen yaz olimpiyatlarında BBC tarafından Londra'ya yerleştirilen geniş ekranlı televizyonlar aracılığıyla vatandaşlar UHD kalitesinde yayın izleme imkânı bulmuştur. Yayınlar fiber optik kablolar aracılığıyla aktarılmıştır.[154]

---

[150] NHK, "World's First Live Relay Experiment of Super Hi-Vision", *Broadcast Technology*, Sayı: 25, 2006, s.16-17.
[151] Hans Hoffman, "More pixels more immersive television experience", *EBU Technical (tech-i)*, Sayı: 7, 2011, s.8-9.
[152] Japan Broadcasting Corporation ve Sharp Corporation, *Sharp and NHK Successfully Develop 85-Inch Direct-View LCD Compatible with Super Hi-Vision a World First*, 2011. http://www.sharp-world.com/corporate/news/110519.html (13.12.2015)
[153] Asia-Pacific Broadcasting Union, "Progression of 3DTV and Ultra High Definition Television", *ABU Technical Review*, Sayı: 250, 2012, s.26-29.
[154] http://www.theguardian.com/media/2011/aug/28/bbc-3d-vision-london-olympics (04.12.2015)

- 2012 yılı Ağustos ayında 4K ve 8K teknolojileri ITU tarafından ITU-R Recommendation BT.2020 ismiyle standart haline getirilmiştir.
- 2013 yılı Ocak ayında NHK kuruluşu, 2016 yılında 8K yayınların Japonya'da başlayacağını duyurmuştur.
- 2013 yılı Ocak ayında Ateme şirketi tarafından H.264/AVC kullanılarak sıkıştırılan 4K yayın, Eutelsat 10A uydusu aracılığıyla yayınlanmıştır. İlgili yayın, 40 Mbit/s veri oranı ile kodlanmış ve 50 fps kare hızına sahiptir. Aynı gün yonga üreticisi Qualcomm CEO'su Paul Jacobs, 2013 yılı itibariyle mobil cihazların Snapdragon 800 isimli yonga aracılığıyla 4K görüntüleri çalıştırabileceğini duyurmuştur.[155]
- 2013 yılı Ocak ayında Broadcom şirketi tarafından H.265/HEVC ile kodlanan videoları çözmek için BCM7445 isimli kod çözücüsü geliştirilmiştir.
- 2013 yılı Nisan ayında SES kuruluşu, dünyada ilk kez 4K yayının H.265/HEVC ile sıkıştırılarak aktarıldığını duyurmuştur. Yayın 20 Mbit/s bit oranı ile kodlanmış olup 3840×2160 çözünürlüğe sahiptir.[156]
- 2013 yılı Mayıs ayında NHK ve Mitsubishi kuruluşlarının ortak çalışmaları sonucunda Super Hi-Vision (SHV) adı verilen 8K görüntülerin H.265/HEVC ile sıkıştırılmasını sağlayan kodlayıcı geliştirilmiştir. Kodlayıcı, 60 fps kare hızı ve 10 bit renk derinliğini desteklemektedir.[157]
- 2013 yılı Eylül ayında High Definition Multimedia Interface (HDMI) Forumu'nda 4K çözünürlüğe ve 60 fps kare hızına sahip görüntülerin izlenebilmesine olanak sağlayan HDMI 2.0 portunun geliştirildiğini açıklanmıştır.[158]
- 2013 yılı Ekim ayında DigitalEurope organizasyonu UHD logosuyla yayın yapabilmek için gereken asgari şartları belirlemiştir. Buna göre yayınların,

[155] Raj Talluri, Snapdragon 800 Series and 600 Processors Unveiled, Qualcomm Technical, 2013.
[156] Société Européenne des Satellites (SES), *SES to pioneer first Ultra HD transmission in new standard at SES Industry Days*, The SES Press Releases, 2013.
http://www.ses.com/4233325/news/2013/15034396 (08.01.2016)
[157] The Mitsubishi Electric, *NHK and Mitsubishi Electric Corporation successfully develop World's First HEVC encoder for 8K*, 2013, s.1-2.
https://www.nhk.or.jp/corporateinfo/english/press/pdf/20130509-002.pdf (13.01.2016)
[158] Gabriele Collier, *HDMI Forum Releases Version 2.0 of the HDMI Specification*, 2013.
http://www.hdmi.org/press/press_release.aspx?prid=133 (23.12.2015)

en az 3840×2160 çözünürlüğü, 8 bit renk derinliğini, 16:9 çerçeve oranını ve 24fps/25fps/30fps/50fps/60fps kare hızlarını desteklemesi gerekmektedir.[159]

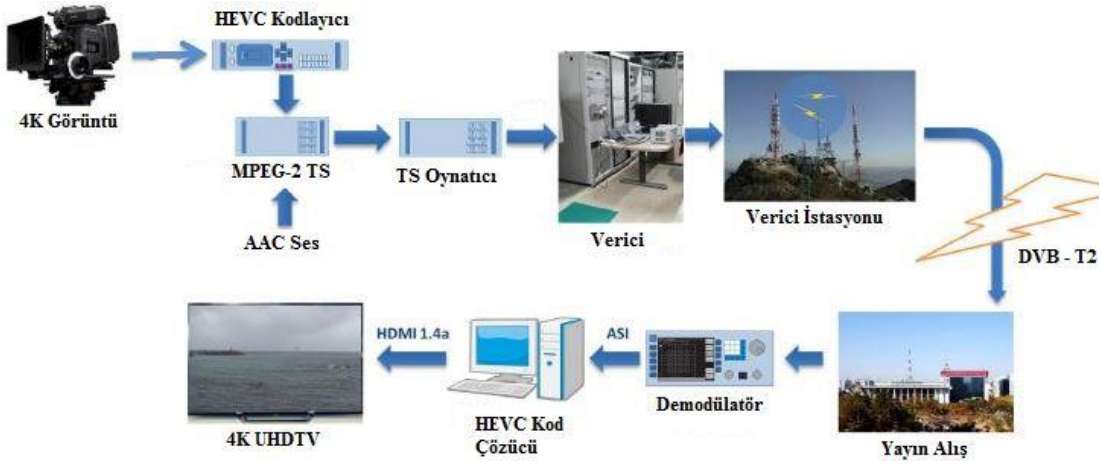
- 2013 yılı Ocak ayında Elemental şirketi tarafından dünyada ilk kez H.265/HEVC teknolojisini kullanarak gerçek zamanlı sıkıştırma yapabilen kodlayıcı üretilmiştir. İlk kez 2013 yılında Japonya'da düzenlenen Osaka Maraton'unda kullanılmıştır.[160]
- 2014 yılı Mayıs ayında Fransa, DVB-T2 ve H.265/HEVC teknolojilerini birlikte kullanarak 4K yayın denemesi gerçekleştirileceğini duyurmuştur.
- Dünya genelinde geniş çaplı 4K yayını ilk kez 2014 Dünya Futbol Şampiyonası sırasında gerçekleştirilmiştir. Sony'nin yerleştirmiş olduğu 4K kameralar aracılığıyla kaydedilen yayınlar Kuzey Amerika, Latin Amerika, Avrupa ve Asya'dan SES-6 uydusu aracılığıyla izlenebilmiştir.
- 2014 yılı Kasım ayında Berlin'de düzenlenen bir rock konseri, H.265/HEVC kullanılarak Astra 19.2 E uydusu üzerinden 4K çözünürlüğünde ve 50 fps kare hızında aktarılmıştır.[161]
- 2015 yılı Ağustos ayında İngiltere Premier Lig'de düzenlenen bir futbol müsabakası ilk kez Avrupa geneline 4K teknolojisi ile yayınlanmıştır. İzleyiciler yayını Avrupa'nın ilk UHD kanalı olan BT Sport Ultra HD'den izleme imkânı bulmuştur.[162]
- 2015 yılı Eylül ayında ilk kez küresel anlamda 4K teknolojisi ile yayın yapan Fashion One 4K kanalı kurulmuştur. Fashion One 4K kanalı, Measat (91.5 E) uydusu aracılığıyla Asya Pasifik, Orta Doğu ve Avustralya'da; SES uydusu (Astra 19.2 E) aracılığıyla Avrupa'da; SES-3 uydusu (103 W) aracılığıyla Kuzey Amerika'da ve NSS-806 uydusu (47.5 W) aracılığıyla Güney Amerika'da izlenilebilmektedir.[163]

---

[159] Mike Wheatley, *4K TVs Allowed To Display UHD Logo Without Ultra HD Colour Space*, The HDTVtest, 2013.
http://www.hdtvtest.co.uk/news/uhd-logo-201310043374.htm (09.02.2016)
[160] David Davies, *Elemental Technologies hails world's first real time 4K HEVC transmission*, The Sports Video Group (SVG), 2013.
[161] Société Européenne des Satellites (SES), *SES and Samsung Mark Ultra HD's First With Live Broadcast of Linkin Park Concert via Satellite*, The SES Press Releases, 2014.
http://www.ses.com/4233325/news/2014/20362143 (09.03.2016)
[162] Alistair Charlton, *BT starts UK's first Ultra HD channel 2 August: Everything you need to know*, The International Business Times, 2015.
[163] http://www.digitaltveurope.net/420321/fashion-one-4k-channel-launches-globally/ (23.02.2016)

3.3.1. Güney Kore

Güney Kore'de 4K yayıncılık ile ilgili çalışmalar, MSIP (Ministry of Science, ICT and Future Planning) ve KCC (Korea Communications Commission) kuruluşlarının iş birliği ile 2012 yılında başlamıştır. İlk test yayını, KCC tarafından 2012 yılı Aralık ayında gerçekleştirilmiş ve 4 ay sürmüştür. Ayrıca, KCC tarafından gerçekleştirilen yayın, dünya genelinde gerçekleştirilen ilk 4K test yayını olma özelliğine sahiptir. İkinci test yayını ise MSIP tarafından 2013 yılı Ocak ayında gerçekleştirilmiş ve 5 ay sürmüştür. Her iki yayın H.265/HEVC ile sıkıştırılarak 256 QAM modülasyon tekniğine sahip DVB-T2 teknolojisi aracılığıyla UHF 64. kanaldan (785 MHz) iletilmiştir. İlk test yayını 30 fps, ikinci test yayını 60 fps kare hızına sahiptir. İlk test yayınına ilişkin görüntülerin kaydedilmesi, iletilmesi ve alınmasına ilişkin adımlar Şekil 3.13'te gösterilmektedir.[164]



Şekil 3.13 İlk 4K test yayını (Güney Kore)

Şekil 3.13'teki ilk test yayınına ilişkin adımları açıklanacak olursa 4K kameralar aracılığı ile kaydedilen görüntü verileri, H.265/HEVC ile ses verileri ise MPEG-4 AAC ile sıkıştırılmaktadır. Görüntü ve ses verileri, MPEG-2 standardında tanımlanmış MPEG-2 TS teknolojisi ile birleştirilerek yayın elde edilmektedir. Yayınlar, vericiye gönderildikten sonra DVB-T2 teknolojisi ile alıcılara ulaşmakta ve alıcı tarafında gerçekleştirilen kod çözme işlemleri ile yayın izlenebilmektedir. Alıcı

[164] Sangjin Hahm, *Status of UHDTV Broadcasting in Republic of Korea*, ITU-R SG6 WP6C Workshop, 2014, s.6.

tarafında kullanılan televizyonun H.265/HEVC kod çözücüsünü içermemesi nedeniyle kod çözme işlemi, bilgisayar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bilgisayarda çözülen yayınlar, HDMI 1.4 portu ile televizyona aktarılmıştır.

İlk test yayını; 4:2:0 örnekleme formatına, 8 bit renk derinliğine ve 30 fps kare hızına sahiptir. Yayın, yazılım tabanlı H.265/HEVC kodlayıcısı olan HM v4.0 ile sıkıştırılarak 30 Mbit/s bit oranı ile iletilmiştir. Sıkıştırma işlemi, 64×64 büyüklüğünde CTU ve Main profil kullanılarak gerçekleştirilmiştir.[165]

MSIP tarafından gerçekleştirilen ikinci test yayınında, ilk test yayınından farklı olarak HM v4.0 yazılımının gelişmiş sürümü olan HM v10.0 ve 60 fps kare hızı kullanılmıştır. Ayrıca, HDMI 1.4 portunun 60 fps kare hızındaki yayınların iletimini gerçekleştirememesi nedeniyle HDMI 2.0 portu kullanılmıştır. Yayına ilişkin diğer özellikler, ilk test yayını ile bire bir aynıdır.[166] 30 fps ve 60 fps kare hızına sahip yayınlar arasındaki veri boyutu farkını belirlemek amacıyla ayrıca bir ölçüm gerçekleştirilmiştir. İlgili ölçüm neticesinde 60 fps kare hızına sahip yayınların%30 daha fazla bit oranına sahip olduğu görülmüştür.

2012 ve 2013 yıllarında gerçekleştirilen başarılı 4K test yayınlarının ardından KBS (Korean Broadcasting System), MBC (Munhwa Broadcasting Corporation) ve SBS (Seoul Broadcasting System) kuruluşlarının işbirliği ile 2014 yılı içerisinde ilk kez canlı olarak 3 farklı 4K yayın gerçekleştirmiştir. İlgili yayınlar, aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- Güney Kore Basketbol Şampiyonası: Dünya genelinde 4K görüntü teknolojisi ile canlı olarak aktarılan ilk yayındır. DVB-T2 ve H.265/HEVC kullanılarak 5 Nisan 2014 tarihinde gerçekleştirilmiştir.
- 2014 Dünya Kupası: Arjantin ve Almanya arasında gerçekleşen final müsabakası da dâhil olmak üzere 3 farklı müsabaka 4K görüntü teknolojisi ile canlı olarak aktarılmıştır. DVB-S2 ve H.265/HEVC kullanılmıştır.

[165] a.g.k., s8.
[166] a.g.k., s.17.

- 2014 Asya Oyunları: Oyunlar kapsamında düzenlenen Erkek ve Kadın Voleybol Şampiyonası Finalleri, 4K görüntü teknolojisi ile canlı olarak aktarılmıştır. DVB-T2 ve H.265/HEVC kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Güney Kore Basketbol Şampiyonası 4K Yayını

Dünya genelinde 4K görüntü teknolojisi ile canlı olarak aktarılan ilk 4K yayındır. H.265/HEVC kodlayıcısı ile gerçek zamanlı olarak sıkıştırılan 4K yayın, KBS kuruluşunun "Kwak-Ak Dağı" ve "Nam Dağı" üzerindeki vericilerine SFN tekniği uygulanarak 713 MHz (53. kanal) frekansından Güney Kore'nin başkenti Seul'e iletilmiştir.[167]

Yayınların iletimi için DVB-T2, video verilerinin kodlanması için H.265/HEVC ve ses verilerinin kodlanması için MPEG-4 AAC teknolojileri kullanılmıştır. Bu kapsamda, video verileri 34 Mbit/s ve ses verileri 144 kbit/s olarak kodlanmıştır. İlgili veriler, MPEG-2 TS standardı ile birleştirilerek 35 Mbit/s bit oranı ile iletilmiştir. Yayınlar, 2160×3840 çözünürlüğe ve 60 fps kare hızına sahiptir.[168]

Güney Kore'de satılan UHD televizyonların büyük çoğunluğu DVB-T2 ve H.265/HEVC teknolojilerini desteklediği için toplumun büyük çoğunluğu canlı olarak gerçekleştirilen ilk 4K yayınını izleme imkânı bulmuştur. Ayrıca, toplumun 4K teknolojisine ilgisini artırmak amacıyla Güney Kore'nin en büyük tren istasyonu olan Seul İstasyonu'na 4K televizyonlar yerleştirilerek yolcuların 4K canlı yayını izlemesi sağlanmıştır.

[167] ITU-R BT.2343-0, *Collection of field trials of UHDTV over DTT networks*, International Telecommunication Union, 2015, s.16.
[168] Injoon Cho, Byungsun Kim, Sangjin Hahm, Sanghun Kim ve Sungho Jeon, "Terrestrial 4K UHD Live Broadcasting of Sports Events", *ABU Technical Review*, Sayı: 261, 2015, s.3.

2014 Dünya Kupası 4K Yayını

Güney Kore halkının 4K yayına ilgisi üzerine KBS, MBC ve SBS kuruluşlarının işbirliği ile Brezilya'da düzenlenen 2014 Dünya Kupası'na ait 3 müsabaka canlı olarak 4K görüntü teknolojisi ile aktarılmıştır. Canlı olarak verilen yayınlar; Kolombiya - Uruguay (Son 16 Turu), Fransa - Almanya (Çeyrek Final) ve Almanya - Arjantin (Final) müsabakalarıdır.

Brezilya'da 4K kameralar kullanılarak kaydedilen yayınlar, iletişim uydusu olan AsiaSat5 üzerinden Seul'de bulunan KBS kuruluşunun yayıncılık merkezine iletilmiştir. Geniş bir kapsama alanı elde etmek amacıyla yayınlar, Seul dışında iki farklı kente (Daejeon ve Jeju Adası) KREONET (The Korean Research Environment Open Network)[169] sistemi üzerinden aktarılmıştır. Aktarım IP tabanlı olarak gerçekleştirilmiş ve ilgili kentlerde IP - ASI (Asynchronous Serial Interface) dönüşümleri gerçekleştirilerek DVB-T2 aracılığıyla yayın gerçekleştirilmiştir. Seul'de gerçekleştirilen yayın ise Kore Basketbol Şampiyonası'nda olduğu gibi SFN tekniği kullanılarak DVB-T2 aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Yayınlar, 2160×3840 çözünürlüğe ve 60 fps kare hızına sahiptir.[170]

- Daejeon: Güney Kore'nin en büyük 3. Kenti olup Seul'e 167 km uzaklıktadır.
- Jeju Adası: Güney Kore'nin en büyük adası olup Seul'e 450 km uzaklıktadır.

Kaydedilen 4K görüntü verileri, Brezilya'da bulunan yayıncılık merkezinde gerçek zamanlı HEVC kodlayıcısı ile 32 Mbit/s olarak kodlanırken ses verileri MPEG-4 AAC teknolojisi ile 128 kbit/s olarak kodlanmıştır. İlgili veriler, MPEG-2 TS standardı ile birleştirilerek 34 Mbit/s bit oranı ile iletilmiştir.[171]

[169] KREONET: Güney Kore'nin kullanmış olduğu bulut teknolojisi benzeri IP tabanlı aktarım olanağı sağlayan sistemdir.
[170] ITU-R BT.2343-0, 2015, s.18.
[171] I. Cho, B. Kim, S. Hahm, S. Kim ve S. Jeon, 2015, s.4.

2014 Asya Oyunları 4K Yayını

2014 Dünya Kupası kapsamında iletilen 4K yayınların toplum üzerindeki etkisi beklenenden fazla olmuş ve bunun üzerine KBS, MBC ve SBS kuruluşlarının işbirliği ile Asya Oyunlarında düzenlenen bazı müsabakalar da canlı olarak 4K görüntü teknolojisi ile aktarılmıştır. Kuruluşlar farklı kategorilerdeki müsabakaları aralarında anlaşarak yayınlamışlardır. KBS, Erkek ve Kadın Voleybol Finallerini; MBC ise Açılış ve Kapanış Seremonilerini; SBS, Plaj Voleybolu Finallerini tercih etmiştir. Ayrıca, 2014 sonlarında gerçekleştirilen Asya Oyunları sırasında ülke genelinin büyük çoğunluğunda HEVC ve DVB-T2 teknolojileri ile uyumlu UHD televizyonlar kullanıldığı için yayınlar halka açık ortamlarda yayınlanmamıştır.[172]

Yayınların iletimi için DVB-T2, video verilerinin kodlanması için H.265/HEVC ve ses verilerinin kodlanması için MPEG-4 AAC teknolojileri kullanılmıştır. Bu kapsamda, video verileri 30 Mbit/s ve ses verileri 128 kbit/s olarak kodlanmıştır. İlgili veriler, MPEG-2 TS standardı ile birleştirilerek 31.5 Mbit/s bit oranı ile iletilmiştir. Yayınlar, 2160×3840 çözünürlüğe ve 60 fps kare hızına sahiptir.[173]

3.3.2. Fransa

Fransa, 2014 yılı içerisinde 4K yayınların avantajı, dezavantajı ve iletiminin ne gibi zorluklar içerebileceğini belirlemek amacıyla Eyfel Kulesi üzerine yerleştirilen vericiler aracılığıyla Fransa Açık Tenis Turnuvası'nı canlı ve bant kayıtları üzerinden test yayınları ile iletmiştir. DVB-T2 ile iletilen yayınların maksimum kapsama alanında izlenebilmesi amacıyla güvenlik aralığı, 1/128 oranında seçilmiştir.

[172] ITU-R BT.2343-0, 2015, s.19.
[173] a.g.k., s.5.

Yayınlar, 25 km yarıçapa sahip alan içerisinde H.265/HEVC ve DVB-T2 teknolojilerini destekleyen bütün UHD televizyonlar aracılığıyla alınabilmiştir. Fransa'da gerçekleştirilen test yayınına ilişkin parametreler Tablo 3.9'da gösterilmektedir.[174]

Tablo 3.9 Fransa'da gerçekleştirilen 4K test yayınına ilişkin parametreler

Ağ Topolojisi	Multi Frequency Network (MFN)
Modülasyon Tekniği	OFDM
Kanal / Kullanılan Bant Genişliği	8 / 7.77 MHz
İletim Frekansı	513.167 MHz (UHF 24.Kanal)
İletim Modu	Single Input Single Output
Taşıyıcı Modülasyon Tekniği	256-QAM
C / N (Taşıyıcı - Gürültü Oranı)	19.7 dB
FFT Boyutu	32k (21.465)
Güvenlik Aralığı / Güvenlik Süresi	1/128 (28μs)
Kodlama Oranı	2/3
Pilot Paterni Türü	PP7
Veri Oranı	40.215 Mbit/s
Video Sıkıştırma Teknolojisi	HEVC (High Efficiency Video Coding)
Verici İstasyonu	Eyfel Kulesi
Verici Antenin Yerden Yüksekliği	313 m
Alıcı Antenlerin Yerden Yüksekliği	10 m
Kapsama Alanı	25 km (Yarıçap)
Minimum Alan Şiddeti	55 dBμV/m at 10 m
4K Yayın Özellikleri	Çözünürlük: 2160×3840 Renk Derinliği: 8 bit Kare Hızı: 50 fps

Turnuva boyunca yayınlar UHD-1 ve UHD-2 olmak üzere iki farklı kategoride iletilmiştir. UHD-1 yayınlar, 4 adet hareketli ve bir adet sabit olmak üzere 5 farklı kamera kullanılarak elde edilmiş ve canlı olarak iletilmiştir. UHD-2 yayınlar ise daha önceden oluşturulmuş bant kayıtlarının iletimi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

[174]a.g.k., s.21.

UHD-1 yayınlar, gerçek zamanlı HEVC kodlayıcılar kullanılarak sıkıştırılmış ve 21.5 Mbit/s bit oranı ile canlı olarak iletilmiştir. UHD-2 yayınlar ise çevrimdışı kodlayıcılar kullanılarak sıkıştırılmış ve 17.5 Mbit/s bit oranı ile banttan iletilmiştir.

UHD-1 yayınlar, 12 Gbit/s veri taşıma hızına sahip fiberler aracılığı ile H.265/HEVC kodlayıcısına aktarıldıktan sonra görüntü verileri 21.5 Mbit/s, ses verileri ise HE-AAC formatında 192 kbit/s bit oranıyla kodlanmıştır. Gerçek zamanlı kodlanan UHD-1 yayınlar ve çevrim dışı kodlanan UHD-2 yayınlar (17.5 Mbit/s) MPEG-2 TS ile birleştirilerek 40 bit/s bit oranı ile DVB-T2 teknolojisi kullanılarak iletilmiştir.[175]

Gerçekleştirilen 4K test yayını sonucu izleyiciler tarafından alınan geri dönüşlerin, "UHD yayın, HD ve Full HD yayına göre çok daha gerçekçi bir etki yaratmaktadır." şeklinde olduğu belirtilmiştir.[176] Ayrıca test yayınını gerçekleştiren kuruluşların görüşünün, "H.265/HEVC aracılığıyla bir tane DVB-T2 multipleksinden iki tane 4K yayın iletmek mümkün olmuştur. Teknolojinin gelişimiyle birlikte bu sayısının 2017 yıllarına doğru 3 olması beklenmektedir." şeklinde olduğu belirtilmiştir.[177]

3.3.3. İspanya

İspanya'da 4K test yayınları, kamu yayıncısı RTVE (Corporación de y Radyo Televizyon Española) ve UPM (Universidad Politécnica de Madrid) kuruluşlarının ortak çalışmalarıyla 2014 yılında gerçekleştirilmiştir. Test yayını, canlı olarak değil bant kayıt üzerinden iletilmiş ve RTVE tarafından oluşturulan 4K çözünürlüğündeki "Prado Museum" isimli belgesel yayınlanmıştır. Test yayınları, Madrid'in kuzey batısında yer alan Ciudad Universitaria bölgesinde gerçekleştirilmiştir.

[175] ITU-R BT.2343-0, 2015, s.23-24.
[176] a.g.k., s.24.
[177] a.g.k., s.24.

İlk test yayını, H.264/AVC teknolojisi ve 25 fps kare hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. H.265/HEVC ile sıkıştırılan videoları çözme özelliğine sahip televizyonların yaygınlaşması ile H.265/HEVC ve 50 fps kare hızı kullanılarak ikinci test yayını gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, deneme yayınları sırasında 20 Mbit/s ve 35 Mbit/s aralığında çok çeşitli bit oranları da kullanılmıştır. DVB-T2 ve H.265/HEVC teknolojilerinin birlikte kullanılması sonucu çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Test yayınlarına ilişkin parametreler Tablo 3.10'da gösterilmektedir.[178]

Tablo 3.10 İspanya'da gerçekleştirilen 4K test yayınına ilişkin parametreler

Yayın Teknolojisi	DVB-T2
Kanal Bant Genişliği	8 MHz
İletim Frekansı	754 MHz (UHF 54.Kanal)
Taşıyıcı Modülasyon Tekniği	64-QAM
C / N (Taşıyıcı - Gürültü Oranı)	19.7 dB
FFT Boyutu	32k (21.465)
Güvenlik Aralığı / Güvenlik Süresi	1/128 (28µs)
Kodlama Oranı	5/6
Pilot Paterni Türü	PP7
Teoride Kullanılabilecek Kapasite	34.72 Mbit/s
Uygulamada Kullanılan Kapasite	35 Mbit/s
Video Sıkıştırma Teknolojisi	HEVC (High Efficiency Video Coding)
Verici İstasyonu	ETSI de Telecomunicación (UPM)
4K Yayın Özellikleri	Çözünürlük: 2160×3840 Renk Derinliği: 8 bit Kare Hızı: 50 fps

Başarılı bir şekilde gerçekleştirilen test yayınlarının ardından İspanya, Brezilya'da düzenlenecek olan 2016 Olimpiyat Oyunları'nı tüm ülkeyi kapsayacak şekilde 4K çözünürlüğünde yayınlama kararı almıştır.

[178] a.g.k., s.25.

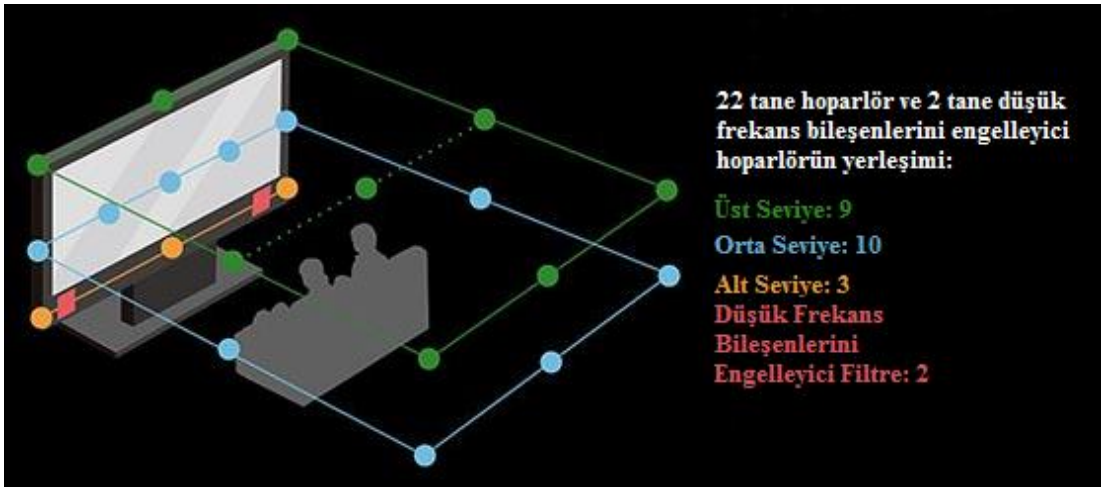
3.3.4. Japonya

Japonya'da ilk 4K test yayını, NHK kuruluşu tarafından 2014 yılında gerçekleştirilmiştir. Yüksek bant genişliği tüketiminden dolayı ilk 4K test yayınları, frekans spektrumunun daha rahat olduğu uydu ortamı üzerinden iletilmiştir. Japonya, 2017 yılında tüm ülkenin 4K yayınlar ile kapsanacağını belirtmektedir. Ayrıca, 2016 yılı itibariyle 8K test yayınının gerçekleştirilmesi ve 2020 Tokyo Olimpiyatları'nın 8K teknolojisi ile izlenebilmesi amaçlanmaktadır.

NHK, 1995 yılında 8K teknolojisinin gelişimi için yatırımlara başlamış ve günümüz itibariyle yaklaşık olarak 1 milyar dolar harcamıştır. 2015 yılında ABD'de düzenlenen NAB konferansında, üretim, iletim ve yayın alış süreçlerinde 8K teknolojisinin nasıl kullanılacağına yönelik sunumlar gerçekleştirmiştir. 8K teknolojisini Super Hi-Vision olarak adlandıran Japonya'nın öncelikli amacı, 2016 yılında 8K test yayınlarına başlamak ve 2018 yılı itibariyle ülke genelinde tam anlamıyla geçişi sağlamaktır.

4K yayınlar, görüntü karesi başına 8.1 milyon piksel içerirken 8K yayınlar, 32.4 milyon piksel içermektedir. Ayrıca 8K yayınlar, sıkıştırılmamış halde saniyede 48Gbit veri taşımaktadır. H.265/HEVC kullanılsa bile Japonya'nın 2018 yılı itibariyle 8K yayına geçmesi ilginç bir fikir olarak değerlendirilmektedir. Japonya'nın geliştirmiş olduğu 8K teknolojisi 22.2 kanallı surround ses sistemi ile beraber gelmektedir. 8K teknolojisinin sunmuş olduğu görüntü çözünürlüğü ile 22.2 kanallı surround ses sisteminin sunmuş olduğu ses kalitesinin izleyicilere çok gerçekçi bir deneyim yaşatacağı düşünülmektedir.[179] 22.2 kanallı surround ses sisteminin tasarımı Şekil 3.14'te gösterilmektedir.

[179] Yasuko Sugito ve diğ., *HEVC/H.265 Codec System and Transmission Experiments aimed at 8k broadcasting*, IBC Conference, 2015, s.8.



Şekil 3.14 22.2 kanallı surround ses sistemi [180]

NHK, 2020 yılında Tokyo'da düzenlenecek olan olimpiyatları 8K kalitesinde dünyaya izletebilme amacı doğrultusunda donanım üreticisi Hitachi şirketi ile yakın işbirliği içerisindedir. Japonya 8K teknolojisi ile uğraşırken dünya genelinde birçok ülke HD yayınların yaygınlaşması ile diğer kısmı ise 4K yayınların karmaşık sorunları ile boğuşmaktadır. Özellikle Amerikalı şirketler, HD yayıncılıktan 4K yayıncılığa geçişin çok ciddi miktarda para gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca, iki yıl gibi kısa bir süre içerisinde 4K teknolojisinden 8K teknolojisine dönüşümün gereksiz ve mali açıdan çok yıpratıcı olacağını vurgulamaktadırlar.[181]

İzleyiciler arasında yapılan anketler sonucu evde televizyonun ortalama izlendiği mesafeden 4K ve 8K yayınlar arasında herhangi bir fark olmadığı belirtilmektedir. Ayrıca, izleyiciler bu mesafede çözünürlükten daha ziyade renk oranı, dynamic range ve kare hızı gibi parametrelerin daha önemli olduğunu vurgulamaktadır. 8K teknolojisinin verimliliği, 85" boyutunun üzerindeki televizyonlarda ortaya çıkmaktadır. Günümüzde ortalama TV boyutunun 47" olduğu düşünülürse kısa vadede insanların bu kadar büyük boyutlara adapte olması pek mümkün görünmemektedir. Japonya'nın 8K teknolojisi konusunda bu kadar atılım

[180] http://www.nhk.or.jp/8k/index_e.html (02.03.2016)
[181] Frank Beacham, *As 4K Begins a Shaky Launch Japan Aggressively Pushes 8K Video*, The Broadcast Bridge, 2015. https://www.thebroadcastbridge.com/content/entry/2547/as-4k-begins-a-shaky-launch-japan-aggressively-pushes-8k-video (29.02.2016)

yapabilmesinin sebebi, NHK kuruluşunun Japon hükümeti tarafından önemli ölçüde desteklenmesidir.

NHK, 6 adet kamera kullanarak Yankee Stadyumu'nda oynanan basketbol maçında ilk kez 8K kayıt yapmıştır. İlk denemenin ardından Kanada'da düzenlenen Dünya Kadınlar Futbol Şampiyonası'nda da aynı teknikleri kullanarak 8K çekim gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, NHK şirketi 2015 yılında düzenlenen Wimbledon Tenis Turnuvası'nı da Super Hi-Vision olarak adlandırılan 8K teknolojisi ile kayıt altına almıştır.[182]

3.3.5. Türkiye

Ülkemizde 4K yayın denemeleri TRT Kurumu, Vestel ve TÜRKSAT işbirliği ile 2014-2015 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Başarılı denemelerin ardından 19 Şubat 2015 tarihinde yapılan tanıtımın ardından TRT 4K kanalı resmen faaliyete geçmiştir. TRT 4K kanalı, Avrupa'da 4K yayın yapan ilk kanal ve dünyada 4K yayın yapan dördüncü kanal konumundadır.

2015 yılı itibariyle H.265/HEVC teknolojisine ait gerçek zamanlı kodlayıcıların kolay temin edilememesinden dolayı TRT 4K kanalı ilk yayınlarını bant kayıtları aracılığı ile gerçekleştirmiştir. İlgili kayıtlar, 4K kameralar aracılığıyla Türkiye'nin doğal güzelliklerinin kaydedilmesiyle oluşturulan belgesellerdir.

UHD TV üreticilerinden Güney Koreli şirket Samsung, TRT Kurumu, TÜRKSAT ve Mediapro işbirliği ile 22 Kasım 2015 tarihinde Fenerbahçe ve Hollanda'nın Ajax takımı arasında oynanan UEFA Avrupa Ligi müsabakası TRT 4K kanalı aracılığı ile yayınlanmıştır. Ülkemizde gerçekleştirilen ilk 4K canlı yayını olması bakımından oldukça önemlidir. İlgili yayın, gerçek zamanlı H.265/HEVC

[182] http://www.newsshooter.com/2015/07/18/resolution-crazy-first-4k-commercial-broadcast-in-japan-nhk-record-the-yankees-in-8k-and-samsung-to-develop-a-11k-display/ (11.02.2016)

kodlayıcı kullanılarak 3840×2160 çözünürlüğünde ve 50 fps kare hızıyla gerçekleştirilmiştir.

Ülkemizde TRT 4K kanalı aracılığıyla gerçekleştirilen yayınlar, TÜRKSAT 2A uydusu üzerinden 12.123 MHz frekansı, H (Yatay) polarizasyon ve 15.000 sembol oranı kullanılarak gerçekleştirilmektedir.[183] TRT Kurumunun gerçekleştirmiş olduğu 4K yayınlarının alınabilmesi için DVB-S2 ve H.265/HEVC teknolojilerinin yanı sıra 50 fps kare hızını destekleyen bir UHD televizyona sahip olmak gerekmektedir.

UHD televizyonların 2016 yılı itibariyle ülkemiz genelinde daha yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. TRT Kurumunun amacı, 2016 yılında düzenlenecek olan ve Türk Milli Takımı'nın da katılacağı Avrupa Futbol Şampiyonası maçlarının büyük çoğunluğunu 4K teknolojisi ile canlı olarak izleyicilere sunabilmektir.

Bölüm 3.3'te çeşitli ülkelerin 4K yayıncılık ve H.265/HEVC teknolojilerine yönelik olarak gerçekleştirmiş olduğu çalışmalar aktarılmıştır. Ayrıca Ek-1'de çeşitli ülkelerin hangi iletim parametrelerini kullanarak test yayınlarını gerçekleştirdiği detaylı olarak gösterilmektedir.[184]

[183] http://www.trthaber.com/haber/ekonomi/4k-ultra-hd-tv-test-yayini-basladi-152994.html (01.03.2016)
[184] https://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high-definition_television (27.03.2016)

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

1940 - 1990 yılları arasında yoğun olarak kullanılan analog televizyon yayıncılığı, 1990'lı yılların başında sayısal televizyon yayıncılığına ait standartların oluşturulmasıyla önemini yitirmiştir. Sayısal televizyon yayıncılığı, analog televizyon yayıncılığından kaynaklanan olumsuzlukları gidermenin yanı sıra frekans spektrumunu daha verimli kullanması sayesinde dünya genelinde hızla kabul görmüştür.

Sayısal tekniklerin televizyon yayıncılığında kullanılması, birçok avantajı beraberinde getirmesine rağmen veri boyutlarının çok ciddi oranda artmasına neden olmuştur. Artan veri boyutlarını azaltma noktasında, 1990'lı yılların başına kadar yoğun olarak kullanılan kayıpsız sıkıştırma teknolojileri yetersiz kalmış ve bunun üzerine, özellikle ITU ve ISO/IEC kuruluşlarının yanı sıra dünya genelinde birçok şirketin çalışmalarıyla kayıplı sıkıştırma teknolojileri geliştirilmiştir. Kayıplı sıkıştırma teknolojileri, veri boyutunu azaltarak verilerin depolanması, iletilmesi ve işlenmesi gibi süreçlerin daha verimli gerçekleşmesini sağlamaktadır. Günümüzde yayıncılık ve internet ortamı başta olmak üzere birçok alan için hayati öneme sahiptir.

Görüntü verilerini sıkıştırma için JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR; ses verilerini sıkıştırma için MP3, AAC ve HE-AAC; video verilerini sıkıştırmak için MPEG-2, H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojileri ön plana çıkmaktadır. Görüntü sıkıştırma teknolojileri, video sıkıştırma teknolojilerinde kullanılan uzamsal örnekleme adımının temelini oluşturması bakımından önem arz etmektedir. Ses ve video sıkıştırma teknolojileri ise sayısal yayıncılık ortamlarından iletilen yayınların veri boyutunu düşürerek iletimin daha kolay gerçekleşmesini sağlamaktadır.

Kayıplı görüntü sıkıştırma teknolojileri, görüntüde insan gözünün daha az duyarlı olduğu yüksek frekans bileşenlerinin atılması prensibine dayanmaktadır. Bu tez kapsamında incelenen kayıplı görüntü sıkıştırma teknolojileri arasında en yüksek sıkıştırma verimliliğini JPEGXR sunmaktadır. JPEGXR teknolojisini sırasıyla JPEG2000 ve JPEG takip etmektedir. JPEGXR, yüksek sıkıştırma verimliliğinin yanı sıra sıkıştırma işlemini diğer teknolojilere oranla daha kısa sürelerde gerçekleştirmektedir. Bu özellikleri sayesinde JPEGXR, görüntü verisini konu alan her platformda kullanılmaktadır.

Kayıplı ses sıkıştırma teknolojileri, ses sinyalinde insan kulağının daha az duyarlı olduğu yüksek frekans bileşenlerinin atılması prensibine dayanmaktadır. Bu tez kapsamında incelenen kayıplı ses sıkıştırma teknolojileri arasında en yüksek sıkıştırma verimliliğini HE-AAC sunmaktadır. HE-AAC teknolojisini sırasıyla AAC ve MP3 takip etmektedir. HE-AAC yüksek sıkıştırma verimliliğinin yanı sıra çok çeşitli örnekleme frekansları ve bit derinliklerinde sıkıştırma imkânı sunmaktadır. Bu esnek yapısı sayesinde sayısal televizyon ve radyo yayıncılığının yanı sıra ses verisini konu alan her platformda kullanılmaktadır.

Video, diğer adıyla hareketli görüntüler, saniyede en az 25 durağan görüntü karesinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmakta ve veri boyutu olarak bu tez kapsamında incelenen görüntü ve ses verilerinden çok daha fazla yer kaplamaktadır. Video verileri, sayısal yayıncılık ortamları üzerinden iletilirken çok yüksek iletim kapasitesi gerektirmekte ve video verilerinin depolanması sorun teşkil etmektedir. Son yıllarda kamera teknolojisinin de gelişimiyle çok daha kaliteli ve yüksek veri boyutlarında yayınlar kaydedilerek izleyicilere sunulmaktadır. Özellikle HD ve 4K yayınların yaygınlaşması frekans spektrumunda yoğunluğa neden olmakta ve bu sorunun çözümü kayıplı video sıkıştırma teknolojilerinin kullanımından geçmektedir.

Genel olarak tüm kayıplı video sıkıştırma teknolojileri; bölümlendirme, çerçeve içi tahmin, çerçeveler arası tahmin, dönüşüm, niceleme ve entropi kodlama olmak üzere benzer adımlardan oluşmaktadır. Çerçeve içi tahmin, görüntü sıkıştırma

teknolojilerinde kullanılan yöntemler aracılığıyla çerçeveler arası tahmin ise art arda gelen görüntü kareleri arasındaki benzerlik kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kayıplı video sıkıştırma teknolojileri, ilgili adımlarda kendilerine özgü uyguladıkları yönteme bağlı olarak farklı seviyelerde sıkıştırma verimliliği sunmaktadır.

Sayısal televizyon yayıncılığında SD yayınların kullanılması MPEG-2, HD yayınların kullanılması ise H.264/AVC video sıkıştırma teknolojisi ile gerçekleşmiştir. Geliştirildiği dönemden günümüze kadar yoğun olarak kullanılan H.264/AVC, sürekli artan HD, Full HD ve 4K yayınların sıkıştırılması noktasında yetersiz kalmış ve bunun üzerine 2013 yılında JVT grubu tarafından H.265/HEVC teknolojisi geliştirilmiştir.

H.265/HEVC, kendisinden önce geliştirilen ve yayıncılık alanındaki hemen her uygulamada kullanılan H.264/AVC teknolojisine göre çok daha verimli bir sıkıştırma imkânı sunmaktadır. H.265/HEVC teknolojisinin verimliliği iki farklı şekilde ortaya çıkmaktadır.

- Sıkıştırma sonrası aynı veri boyutu elde edilmek isteniyorsa H.265/HEVC ile sıkıştırılan yayınlar, H.264/AVC ile sıkıştırılan yayınlara göre iki kat daha kalitelidir.

- Sıkıştırma sonrası aynı kalite değeri elde edilmek isteniyorsa H.265/HEVC ile sıkıştırılan yayınların veri boyutu, H.264/AVC ile sıkıştırılan yayınların veri boyutunun yarısı kadardır.

Frekans spektrumu sınırlı bir kapasiteye sahip ulusal bir kaynaktır. Bu nedenle, verimli bir şekilde planlanması büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda, Karasal Sayısal Televizyon (DVB-T2) Ulusal Frekans Planı, 15 Mayıs-16 Haziran 2006 tarihleri arasında Cenevre/İsviçre'de yapılan Bölgesel Radyokomüniskasyon Konferansında belirlenen alan tahsisleri (allotment) ve nokta tahsisleri (assignment) temel alınarak 2012 yılında Radyo ve Televizyon Üst Kurulu tarafından ülkemiz için hazırlanmıştır.

Karasal Sayısal Televizyon Ulusal Frekans Planı, frekans spektrumunda VHF Band III (174 - 230 MHz) ve UHF VI/V (470 - 790 MHz) bantlarında olmak üzere RRC 2006 Konferansında televizyon yayınları için ayrılmış olan 5 - 10. kanallar (VHF) ile 21 - 60. kanallar (UHF) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Plan çerçevesinde karasal sayısal televizyon yayıncılığı standardı olarak DVB-T2 tercih edilmiş ve DVB-T2 teknolojisine bağlı olarak taşınabilir bina içi ve taşınabilir bina dışı alış tipi, 32k iletim modu, 19/256 güvenlik aralığı, 2/3 kodlama oranı, 64 QAM modülasyon tipi ve PP4 parametreleri seçilmiştir. İlgili parametreler ışığında 1 UHF multipleksinin iletim kapasitesi 27 Mbit/s olarak elde edilmiştir.

H.264/AVC teknolojisi dikkate alınarak hazırlanan plan doğrultusunda 27 Mbit/s iletim kapasitesi aracılığıyla, 3 HD ve 2 SD program veya 11 SD program iletilebilmektedir. H.265/HEVC teknolojisinin kullanılması durumunda ise aynı iletim kapasitesinden 21 SD, 9 HD veya 7 Full HD program iletilebilecektir. Bu noktada, planın hazırlandığı dönem itibariyle gündemde olmayan 4K yayıncılığa ayrı bir parantez açmak gerekmektedir. H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda 27 Mbit/s iletim kapasitesi aracılığıyla 2 veya 3 adet 4K çözünürlüğünde yayın iletilebilecektir.

RTÜK tarafından 2012 yılında hazırlanan Ulusal Sayısal Karasal Frekans Planı doğrultusunda ihaleye çıkılmış ve ihale çeşitli mahkemeler tarafından alınan kararlar doğrultusunda iptal edilmiştir. Söz konusu ihale, 7 UHF multipleksi kullanılarak elde edilen 189 Mbit/s toplam iletim kapasitesi doğrultusunda 8 Ulusal Genel HD, 3 Ulusal Tematik HD, 11 Ulusal Genel SD, 11 Ulusal Tematik SD, 4 Bölgesel SD, 7 Yerel SD ve TRT Kurumu için 1 HD ve 9 SD olmak üzere toplam 12 HD ve 42 SD program üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ancak, 2 - 27 Kasım 2015 tarihinde gerçekleştirilen WRC toplantısında 470 - 790 MHz frekans bandıyla ilgili olarak alınan Resolution COM 4/4 Çözüm Kararı'na göre ülkemizin de içinde yer aldığı 1.Bölge (Region 1) için 694 - 790 MHz frekans bandının IMT servislerine birinci öncelikli tahsisi yönünde karar verilmiştir. Bu karar doğrultusunda, kullanılabilecek UHF multipleks sayısı 6'ya düşmektedir. DVB - T2 teknolojisine

bağlı olarak seçilen parametrelerin aynı olması durumunda 6 UHF multipleksi aracılığıyla toplam 162 Mbit/s iletim kapasitesi elde edilmektedir.

Avrupa Yayın Birliği (EBU) tarafından 2016 Mart ayında yayınlanan "*TV Programme Accommodation in a DVB-T2 Multiplex For (U)HDTV with HEVC Video Coding*" isimli dokümanda SD, HD, Full HD ve 4K yayınların, HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda sırasıyla 1.2 Mbit/s, 2.8 Mbit/s, 3.8 Mbit/s ve 12 Mbit/s bit oranları ile iletilebileceği belirtilmiştir. Frekans planının H.265/HEVC doğrultusunda revize edilmesi durumunda 6 UHF multipleksi kullanılarak toplam 126 SD, 54 HD, 42 Full HD veya 12 - 18 aralığında 4K program iletilebilecektir. Tüm varyasyonlar için iletilebilecek SD - HD ve HD - Full HD program sayıları Ek-2 ve Ek-3'te detaylı olarak belirtilmiştir. Ayrıca, 4K yayıncılığa olan talep doğrultusunda HD ve SD program sayısı azaltılarak 4K program sayısı artırılabilir.

Bu noktada dikkat çekici unsur, 2012 yılında hazırlanan frekans planında 42 SD ve 12 HD olmak üzere toplam 54 programın iletilebileceği öngörülmüştür. 2015 yılında alınan WRC kararına göre 1 multipleks azalmasına rağmen H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda yine aynı sayıda ancak tamamı HD görüntü teknolojisine sahip program iletmek mümkün olacaktır.

Avrupa Yayın Birliği (EBU) çeşitli raporlarında sayısal karasal yayıncılık için kullanılan 470 - 694 MHz frekans bandının IMT servislerine en erken 2030 yılında verilebileceğini öngörmektedir. Ayrıca, H.265/HEVC teknolojisinin frekans planı doğrultusunda iletilebilecek program sayısını çok ciddi oranda artıracağı net olarak ortadadır. Bu kapsamda, en az 10 yıl daha sayısal karasal yayıncılık için kullanılacak 470 - 694 MHz frekans bandının H.265/HEVC teknolojisi doğrultusunda Radyo ve Televizyon Üst Kurulu tarafından tahsis edilmesinin ülke çıkarları açısından oldukça önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Sayısal uydu yayıncılığında iletim kapasitesi, kullanılan yayın teknolojisine bağlı olarak FEC oranı, sembol oranı ve modülasyon tipi gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. DVB-S, DVB-S2 ve DVB-S2x yayın teknolojilerine bağlı olarak 1 transponder kullanılarak elde edilen ortalama iletim kapasitesi sırasıyla 45 Mbit/s, 60 Mbit/s ve 84 Mbit/s şeklindedir.

Ülkemizde sayısal uydu yayıncılığı TÜRKSAT uyduları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Mevcut durumda sayısal uydu yayıncılığında DVB-S2 ve H.264/AVC teknolojileri birlikte kullanılmaktadır. DVB-S2 teknolojisinin sunmuş olduğu 60 Mbit/s ortalama iletim kapasitesinden H.264/AVC ile sıkıştırılmaları durumunda 12 HD program iletilebilmektedir. Aynı iletim kapasitesinden H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda yaklaşık 22 HD program iletmek mümkün olacaktır. Ayrıca, 2014 yılında geliştirilen ve henüz standart haline gelmeyen DVB-S2x teknolojisinin sunmuş olduğu 84 Mbit/s ortalama iletim kapasitesinden H.265/HEVC ile sıkıştırılmaları durumunda 30 HD program iletmek mümkün olacaktır.

H.265/HEVC, sahip olduğu yüksek sıkıştırma verimliliğini karmaşık tasarımına borçludur. Karmaşık tasarımı nedeniyle sıkıştırma işlemini çok uzun sürelerde gerçekleştirebilmektedir. Bu yüzden, geliştirildiği ilk dönemlerde canlı olarak iletilen yayınların sıkıştırılması için kullanılamamıştır. 2015 yılı itibariyle farklı şirketler tarafından gerçek zamanlı kodlayıcıların geliştirilmesi ile canlı olarak iletilen yayınlar H.265/HEVC kullanılarak sıkıştırılabilmektedir. Günümüz itibariyle H.265/HEVC ile sıkıştırılan HD, Full HD ve 4K canlı yayınlar izleyicilerle buluşturulmaktadır. Hatta ülkemizde TRT Kurumu tarafından UEFA Avrupa Ligi'nde Fenerbahçe ve Ajax takımları arasında oynanan futbol müsabakası 4K kameralar aracılığıyla kaydedildikten sonra H.265/HEVC kullanılarak sıkıştırılmış ve TRT 4K kanalı üzerinden izleyicilerle buluşturulmuştur. İlgili 4K yayın, Avrupa genelinde gerçekleştirilen öncü uygulamalardan biri olması bakımından oldukça önemlidir.

Sayısal televizyon yayıncılığında en büyük hedef, yayınların frekans spektrumu üzerinden az bant genişliği harcayarak iletilmesi ve görüntü kalitesinin artırılmasıdır. Bu noktada, H.265/HEVC teknolojisinin sahip olduğu sıkıştırma verimliliği ile önemli bir çözüm olacağı değerlendirilmektedir.

H.265/HEVC teknolojisinin gelişimine bağlı olarak ülkemizde yayıncılık alanını düzenleyici ve denetleyici otorite konumunda bulunan Radyo ve Televizyon Üst Kurulu'nun yanı sıra altyapı/platform işletmecisi kuruluşlar, medya hizmet sağlayıcı kuruluşlar ve dolaylı olarak TV üreticilerinin birlikte hareket etmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Altyapı/platform işletmecisi kuruluşlar, yayınların H.265/HEVC ile sıkıştırılarak iletilmesi durumunda önemli bir kapasite kazancı elde edeceklerdir. Kapasite artışı, iletilecek yayın sayısını ve görüntü kalitesini artıracak dolayısıyla iletim için gerekli olan enerji miktarı ve işletme bedeli azalacaktır. Bu durum, altyapı/platform işletmecilerinin yanı sıra medya hizmet sağlayıcı kuruluşlar için de büyük avantajları beraberinde getirmektedir. Kapasitenin artması sayesinde medya hizmet sağlayıcı kuruluşların altyapı/platform işletmecisi kuruluşlara ödemiş olduğu kiralama bedelleri düşecektir. Ayrıca, H.265/HEVC teknolojisinin kullanılmasıyla birlikte mevcut durumda SD görüntü teknolojisi kullanan medya hizmet sağlayıcı kuruluşların HD yayıncılığa geçişi daha kolay gerçekleşecektir.

Yayıncılık alanında faaliyet gösteren kurum ve kuruluşların işbirliği ile H.265/HEVC teknolojisinin yakın gelecekte tüm iletim ortamlarında kullanılması beklenmektedir. Bu bağlamda, H.265/HEVC ile sıkıştırılan yayınların izleyiciler tarafından alınabilmesi için TV alıcılarında H.265/HEVC kod çözücüsünün bulunması gerekmektedir. Aksi halde, ilgili yayınların izlenebilmesi mümkün değildir. TV üreticilerinin, bu durumu göz önünde bulundurarak üretim yapmalarının kendileri ve son kullanıcılar açısından faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Dünya genelinde yayıncılık konusunda yaşanan gelişmeler çok hızlı bir şekilde ilerlemektedir. HD ve Full HD yayınların dahi pazara tam olarak yerleşmediği bir ortamda birçok ülke 4K ve 8K yayın denemeleri gerçekleştirmekte ve tam anlamıyla geçiş için çeşitli tarihler öngörmektedir. Böyle bir ortamda, yayıncılık alanındaki güncel gelişmelerin takip edilmesi ülkemiz açısından büyük önem arz etmektedir.

Frekans spektrumunda yaşanan yoğunluk için iki farklı çözüm kullanılmaktadır. Birincisi, yayın teknolojilerinin geliştirilerek iletim kapasitesinin artırılması iken ikincisi ise sıkıştırma teknolojilerinin verimliliğini artırarak yayınların iletimi için gerekli olan veri miktarlarının düşürülmesidir. Bu tez, ikinci çözüm kapsamında ele alınmış ve sayısal televizyon yayıncılığında kullanılan görüntü, ses ve video sıkıştırma teknolojileri hakkında kapsamlı bilgiler verilerek dünya genelinde gerçekleştirilen çalışmalar aktarılmıştır. Bu bağlamda, söz konusu tez çalışmasının konu ile ilgili çalışacak kurum, kuruluş ve kişilere yol gösterici nitelikte olması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

Aguilera, Paula (2006), *Comparison of different image compression formats*, Wisconsin College of Engineering: ECE 553 Project Report.

Akbulut, Orhan (2007), *Bir-Bit Dönüşümü Temelli Blok Hareket Kestirimlerinin H.264/AVC'ye Uygulanması*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli.

Apostolopoulos, John G. (2004),*Video Compression*, Hewlett-Packard Laboratories. http://www.slideshare.net/chetanrao2012/videocompression2004 (19.08.2015)

Arı, Güneş (2011), *H.264 Videolarının İletiminde Hata Kurtarımı*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

Asia-Pacific Broadcasting Union (2012), "Progression of 3DTV and Ultra High Definition Television", *ABU Technical Review*, Sayı:250, s.26-29.

Bağlan, Sezer (2014), *JPEGXR Başarımı*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Beacham, Frank (2015), *As 4K Begins a Shaky Launch Japan Aggressively Pushes 8K Video*, The Broadcast Bridge. https://www.thebroadcastbridge.com/content/entry/2547/as-4k-begins-a-shaky-launch-japan-aggressively-pushes-8k-video (29.02.2016)

Boruch, A. Dabrowska ve Wiatr, Kazimierz (2011), "Implementation of FCT Transformation in JPEG-XR Standard in Programmable Devices", *Automatyka Dergisi*, Cilt:3, Sayı:15, s.2-3.

Brandenburg, Karlheinz (1999), *MP3 and AAC Explained*, Fraunhofer Institute for Integrated Circuits FhG-IIS A, Almanya.

Bruna, Arcangelo (2008), *JPEG*, Advanced System Technology, Catania.

Budagavi, Madhukar, Fuldseth, Arild, Bjøntegaard, Gisle, Sze, Vivienne ve Sadafale, Mangesh (2013), "Core Transform Design in the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard", *IEEE Journal Of Selected Topics In Signal Processing*, Cilt:7, Sayı:6, s.1029-1039.

Callicó, Gustavo Marrero ve Suárez, Sebastián López (2014), *Wide Comparison Between H.264/AVC and H.265/HEVC*. http://www.slideshare.net/mwalendo/h264vs-hevc (23.10.2015)

Charlton, Alistair (2015), *BT starts UK's first Ultra HD channel 2 August: Everything you need to know*, The International Business Times.

Cho, Injoon, Kim, Byungsun, Hahm, Sangjin, Kim, Sanghun ve Jeon, Sungho (2015) "Terrestrial 4K UHD Live Broadcasting of Sports Events", *ABU Technical Review*, Sayı:261, s.3.

Cohen, Yossi (2010), *Introduction to Video Compression*, 2010. http://www.slideshare.net/DSPIP/introduction-to-video-compression-3244304 (23.07.2015)

Collier, Gabriele (2013), *HDMI Forum Releases Version 2.0 of the HDMI Specification*. http://www.hdmi.org/press/press_release.aspx?prid=133 (23.12.2015)

CompuServe Incorporated, *Graphics Interchange Format Programming Reference*, Ohio, 1990. https://www.w3.org/Graphics/GIF/spec-gif89a.txt (16.07.2015)

Davies, David (2013), *Elemental Technologies hails world's first real time 4K HEVC transmission*, The Sports Video Group (SVG).

Duenas, Alberto (2013), *Development of a 4K 10-Bits HEVC Encoder*, IBC Conference. http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/ibc.2013.0003 (07.10.2015)

Dufaux, Frédéric, Sullivan, Gary J. ve Ebrahimi, Touradj (2009), "The JPEG XR Image Coding Standard", *IEEE Signal Processing Magazine*, Cilt:26, Sayı:6, s.196.

Ebrahimi, Farzad, Chamik, Matthieu ve Winkler, Stefan (2004), *JPEG vs. JPEG2000: An Objective Comparison of Image Encoding Quality*, The SPIE 49th Annual Meeting: International Society for Optics and Photonics.

Elemental Technologies (2013), *A Primer on the H.265 Video Codec*, Elemental White Paper.

Erşahin, A. Hüseyin (2009), *H.264/AVC ile Düşük Gecikmeli Sıkıştırma*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

European Broadcasting Union (2016), *An Introduction to Time-Frequency Slicing*, EBU Technical Report, Cenevre.

European Broadcasting Union (2016), *TV Programme Accommodation in a DVB-T2 Multiplex For (U)HDTV with HEVC Video Coding*, EBU Technical Report, Cenevre.

Fu, Chih-Ming ve diğ. (2012), "Sample Adaptive Offset in the HEVC Standard", *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, Cilt:22, Sayı:12, s. 1753-1788.

Gedik, Alper (2009), *Yeni İletişim Teknolojilerinden Yüksek Tanımlamalı (HD) Yayın Sistemleri ve Odyovizüel Veri Transferindeki Pratikleşme*, Ege Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

Goldman, Matthew (2014), *High Efficiency Video Coding (HEVC)*, Ericsson. https://www.smpte.org/sites/default/files/section-files/HEVC%20tutorial%20C.pdf (16.10.2015)

Göçeri, Evgin ve Yaldır, A. Kadir (2007), "Jpeg2000 Standardının Yeni Özelliklerini Destekleyen Bir Görüntü İşleme Uygulaması Geliştirilmesi", *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt:13, Sayı:3, s.337-338.

Gray, Karen L. ve Bör, Andrea (2013), *The JPEG2000 Standard*, Technische Universitat, Almanya.

Hahm, Sangjin (2014), *Status of UHDTV Broadcasting in Republic of Korea*, ITU-R SG6 WP6C Workshop.

Hispasat (2013), *DVB-EBU UHDTV Fact Findings*.

Hoffman, Hans (2011), "More pixels more immersive television experience", *EBU Technical (tech-i)*, Sayı:7, s.8-9.

ITU-R BT.2343-0 (2015), *Collection of field trials of UHDTV over DTT networks*, International Telecommunication Union.

Japan Broadcasting Corporation ve Sharp Corporation (2011), *Sharp and NHK Successfully Develop 85-Inch Direct-View LCD Compatible with Super Hi-Vision a World First*.
http://www.sharp-world.com/corporate/news/110519.html (13.12.2015)

Kaushik, Pooja ve Sharma, Yuvraj (2012), "Comparison Of Different Image Enhancement Techniques Based Upon Psnr & Mse", *International Journal of Applied Engineering Research*, Cilt:7, Sayı:11.

Kınık, A. Murat (2014), "Sayısal Uydu Teknolojisinin Gelişimi ve Türkiye'de Yayıncılığın Geleceği", *Akademik Bakış Dergisi*, Sayı:41, s.5-7.

Kim, Il-Koo, Min, Junghye, Lee, Tammy, Han, Woo-Jin ve Park, JeongHoon (2012), "Block Partitioning Structure in the HEVC Standard", *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, Cilt:22, Sayı:12, s.1700.

Korkut, Cüneyt (2013), *Yeni İletişim Teknolojilerinin Televizyon Yayıncılık Sistemlerinde Kullanımı: Atatürk Üniversitesi Televizyonu Örneği*, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.

Köse, A. Hazal (2011), *Gelişen TV Teknolojileri Çerçevesinde, Yerel Televizyonlar ve Sayısal Yayıncılık, Ege Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

Lainema, Jani ve Ugur, Kemal (2011), *Angular Intra Prediction in High Efficiency Video Coding (HEVC)*'den aktaran, Manohar Kuse, *Intra Coding in HEVC*, 2014, s.9-15. https://kusemanohar.files.wordpress.com/2014/04/hevc-intra-coding-mtrec-group-meeting.pdf (13.09.2015)

Lainema, Jani ve Ugur, Kemal (2011), *Angular Intra Prediction in High Efficiency Video Coding (HEVC)*, IEEE 13th International Workshop: Multimedia Signal Processing (MMSP).

Lainema, Jani, Bossen, Frank, Han, Woo-Jin, Min, Junghye ve Ugur, Kemal (2012), *Intra Coding of the HEVC Standard*, IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology, Cilt:22, Sayı:12, s.1793.

Limmer, Christoph ve Chabrol, Michel (2014), *Ultra High Definition Market Outlook and Next Steps*, Eutelsat Technical.

Lin, Jian-Liang, Chen, Yi-Wen, Huang, Yu-Wen ve Lei, Shaw-Min (2013), "Motion Vector Coding in the HEVC Standard", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Cilt:7, Sayı:6, s.957-958.

Marshall, David ve Sidorov, Kirill, *CM3106 Chapter 14: MPEG Audio*, Cardiff University.

MEGEP (2006), *Radyo-Televizyon Yapım ve Yayıncılığı: Televizyon Yayıncılığının Temelleri*, MEB Yayınları, Ankara.

Meltzer, Stephan ve Moser, Gerald (2006), *MPEG-4 HE-AAC v2: audio coding for today's digital media world*, EBU Technical Review.

Mesut, Altan (2006), *Veri Sıkıştırmada Yeni Yöntemler*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Doktora Tezi, Edirne.

Milli Eğitim Bakanlığı (2013), *Bilişim Teknolojileri: Haberleşme Teknikleri*, Milli Eğitim Bakanlığı Öğrenim Materyali, Ankara.

Milli Eğitim Bakanlığı (2011), *Fotoğraf, Ses ve Video Formatları*, Milli Eğitim Bakanlığı Öğrenim Materyali, Ankara.

Mitrovic, Djordje (2012), *Video Compression*, University of Edinburg.

Morrod, Tom ve Border, Ed (2013), *TV Technology and TV Systems: Intelligence Services*, IHS Electronics&Media.

Nagori, Soyeb ve Jain, Anurag, *Introduction to Video Compression Techniques*, Texas Instruments Technology: Training Material.

Nguyen, Tung ve diğ. (2013), "Transform Coding Techniques in HEVC", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Cilt:7, Sayı:6, s.979.

NHK (2006), *World's First Live Relay Experiment of Super Hi-Vision*, Broadcast Technology, Sayı:25, s.16-17.

Ohm, Jens-Rainer, Sullivan, Gary J., Schwarz, Heiko, Tan Thiow K., ve Wiegand, Thomas (2012), "Comparison of the Coding Efficiency of Video Coding Standards – Including High Efficiency Video Coding (HEVC)", *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, Cilt:22, Sayı:12, s.1678-1680.

Özdemir, Önder (2008), "Türkiye'deki Kablolu TV Teknolojileri", *Broadcasterinfo Dergisi*, Sayı: 57. http://www.tilda.com.tr/arsiv/makal_kablolutv.pdf (25.06.2015)

Öztekin, Abdülkerim (2012), *Fast Encoder Implementation In High Efficiency Video Coding (H.265/HEVC)*, University of Gaziantep Graduate School of Natural & Applied Sciences, M. Sc. Thesis, Gaziantep.

Öztürk, Emir (2012), *Görüntü Sıkıştırma Yöntemlerinin Etkinliğini Arttıran Dönüşüm ve Bölümlendirme İşlemleri*, Trakya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Edirne.

Pryor, Simon (2013), *Migration Strategies for S2 Extension, HEVC&UHDTV*, Newtec White Paper. http://www.newtec.eu/frontend/files/userfiles/files/Whitepaper%20strategies%20for%20DVB-S2%20extensions%20HEVC%20UHDTV%20Rev2.pdf (09.02.2016)

Radyo ve Televizyon Üst Kurulu (2012), *Türkiye Karasal Sayısal Televizyon (DVB-T2) Ulusal Frekans Planı*, RTÜK.

Recommendation ITU-R BT.601 (1995), *Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios*, International Telecommunication Union.

Recommendation ITU-R BT.709-1 (1993), *HDTV standard for the studio and for international programme exchange*, International Telecommunication Union.

Recommendation ITU-T H.265 (2015), *High Efficiency Video Coding Standard*, International Telecommunication Union.

Recommendation ITU-T H.265, *High Efficiency Video Coding Standard*'dan aktaran, Abdülkerim Öztekin, *Fast Encoder Implementation In High Efficiency Video Coding (H.265/HEVC)*, University of Gaziantep Graduate School of Natural & Applied Sciences, M. Sc. Thesis, Gaziantep, 2012, s.38.

Richardson, Iain E.G. (2010), *An Introduction to H.264 Advanced Video Coding*, The Vcodex Technical.

Richardson, Iain E.G. (2013), *An Introduction to High Efficiency Video Coding*, VCODEX Video Compression. http://www.vcodex.com/hevc-an-introduction-to-high-efficiency-coding/ (29.09.2015)

Richardson, Iain E.G. (2003), *H.264 and MPEG-4 Video Compression: Video Coding for Next-Generation Multimedia*, John Wiley & Sons Ltd.

Oktay Sirrik, "Digital Video Broadcasting Neden, Nasıl?", s.5-7. http://www.satturkey.com/download/makale.pdf (17.06.2015)

Özdamar, Kazım (2003), *Modern Bilimsel Araştırma Yöntemleri*, Kaan Kitabevi, Eskişehir.

Société Européenne des Satellites (SES) (2013), *SES to pioneer first Ultra HD transmission in new standard at SES Industry Days*, The SES Technical. http://www.ses.com/4233325/news/2013/15034396 (08.01.2016)

Société Européenne des Satellites (SES) (2014), *SES and Samsung Mark Ultra HD's First With Live Broadcast of Linkin Park Concert via Satellite*, The SES Technical. http://www.ses.com/4233325/news/2014/20362143 (09.03.2016)

Sugito, Yasuko ve diğ. (2015), *HEVC/H.265 Codec System and Transmission Experiments aimed at 8k broadcasting*, NHK and Mitsubishi Electric Corporation, Japonya.

Sullivan, Gary J., Ohm, Jens-Rainer, Jin, Woo-Han ve Wiegand, Thomas (2012), "Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard", *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, Cilt:22, Sayı:12, s.1651.

Sullivan, Gary J., Topiwala, Pankaj ve Luthra, Ajay (2004), *The H.264/AVC Advanced Video Coding Standard: Overview and Introduction to the Fidelity Range Extensions*, The SPIE 49th Annual Meeting: SPIE Conference on Applications of Digital Image Processing XXVII, 2004.

Svs Telekom & Satellite Systems (2008), "IPTV Tanım ve Genel Bakış", s.1-7. www.satturkey.com/makale/IPTV.pdf (28.06.2015)

Sze, Vivienne ve Budagavi, Madhukar (2014), *Design and Implementation of Next Generation Video Coding Systems*, ISCAS Tutorial.

Şişman, Çağrı (2014), *Veri Sıkıştırma ve Veri Şifreleme Algoritmalarının Ağ Üzerinde Beraber Kullanımı ve Performansının İncelenmesi*, Trakya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Edirne.

Talluri, Raj (2013), *Snapdragon 800 Series and 600 Processors Unveiled*, Qualcomm Technical.

Taşkın, Cem (2010), *MPEG-2 Kodlanmış Video Görüntülerinin İçerik Tabanlı Sorgulanması*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayımlanmış Doktora Tezi, Edirne.

Technicolor (2014), *UltraHD: Sooner than expected*, Technicolor White Paper http://www.slideshare.net/TechnicolorCo/white-paper-uhd (16.11.2015)

The Mitsubishi Electric (2013), *NHK and Mitsubishi Electric Corporation successfully develop World's First HEVC encoder for 8K.* https://www.nhk.or.jp/corporateinfo/english/press/pdf/20130509-002.pdf (13.01.2016)

Turbak, Lyn (2011), *Codes and Compression: Huffman Tree Example*, Wellesley College. http://cs.wellesley.edu/~cs231/fall01/huffman-example.pdf (03.07.2015)

Türk Dil Kurumu Güncel Türkçe Sözlük, http://www.tdk.gov.tr/index.php?option=com_gts (29.03.2016)

Vieron, Jérôme (2012), *HEVC: High-Efficiency Video Coding (Next Generation Video Compression)*, WBU-ISOG Forum.

Wheatley, Mike (2013), *4K TVs Allowed To Display UHD Logo Without Ultra HD Colour Space*, The HDTVtest. http://www.hdtvtest.co.uk/news/uhd-logo-201310043374.htm (09.02.2016)

Wong, Alan (2015), *UHD with AsiaSAT*, AsiaSat Proprietary & Confidential.

Yaveroğlu, Tolga (2011), *Sayısal TV Yayıncılık*'tan aktaran, Cüneyt Korkut, *Yeni İletişim Teknolojilerinin Televizyon Yayıncılık Sistemlerinde Kullanımı: Atatürk Üniversitesi Televizyonu Örneği*, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, 2013, s.24-25.

Yıldız, Mehtap *Araştırmalarda Kaynak Tarama Yöntemleri*, Ankara Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

ELEKTRONİK KAYNAKLAR

http://aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/2016-sonuna-dogru-tamamen-4k-yayina-gecebiliriz/449152 (11.03.2016)

http://carltonbale.com/does-4k-resolution-matter/ (05.12.2015)

https://en.wikipedia.org/wiki/Lempel-Ziv-Welch (04.08.2015)

https://en.wikipedia.org/wiki/PAL (14.06.2015)

https://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high-definition_television (27.03.2016)

http://manual.audacityteam.org/o/man/mixing.html (14.08.2015)

http://multimedia-technology.googlecode.com/svn/trunk/lab2_jpeg/info/PSNR.pdf (08.07.2015)

http://technewsrss.com/ultra-hd-and-4k-explained/ (18.11.2015)

http://www.chip.com.tr/haber/mp3-formatinin-tarihi.-paylasim-aglari_26163_7.html (11.08.2015)

http://www.cnet.com/news/what-is-hevc-high-efficiency-video-coding-h-265-and-4k-compression-explained/ (15.10.2015)

http://www.digitaltveurope.net/420321/fashion-one-4k-channel-launches-globally/ (23.02.2016)

https://www.dvb.org/news/worldwide (18.06.2015)

http://www.fotografteknikleri.com/photoshop-ile-hdr-fotograf-olusturmak/ (26.03.2016)

http://www.gastrohep.com/ebooks/thumbnails.asp?book=1405120762&id=5 (28.07.2015)

https://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/Digital/DIGI_13.html (18.06.2015)

http://www.math.tau.ac.il/~dcor/Graphics/adv-slides/entropy.pdf (09.07.2015)

http://www.newsshooter.com/2015/07/18/resolution-crazy-first-4k-commercial-broadcast-in-japan-nhk-record-the-yankees-in-8k-and-samsung-to-develop-a-11k-display/ (11.02.2016)

http://www.nhk.or.jp/8k/index_e.html (02.03.2016)

http://www.theguardian.com/media/2011/aug/28/bbc-3d-vision-london-olympics (04.12.2015)

http://www.trthaber.com/haber/ekonomi/4k-ultra-hd-tv-test-yayini-basladi-152994.html (01.03.2016)

http://www.tvjuneau.com/?page=HDTV(03.12.2015)

EKLER

Ek 1 Sayısal Karasal Yayın Teknolojileri ile H.265/HEVC Teknolojisinin Birlikte Kullanımına İlişkin Dünya Örnekleri

Tür	Ülke	Verici İstasyonu	Kapsama Alanı	Sayısal Karasal Yayın Sistemi	Kanal Bant Genişliği	İletim Modu	Multiplex Kapasitesi	Sinyal Bit Oranı	Video Kodlama Teknolojisi	Çerçeve Özellikleri	Ses Kodlama Standardı	Kullanılan Merkez Frekansı
8K	Japonya	NHK Hitoyoshi İstasyonu	Hiyotoshi	ISDB-T	6 MHz	32k GI=1/32 4096 QAM FEC= 3/4 MIMO	91.8 Mbit/s	91.0 Mbit/s	H.264 (AVC)	7680×4320p Kare Hızı=59.94 fps Bit D= 8 bits/piksel	MPEG-4 AAC 384 kbit/s	671 MHz (44. Kanal)
		NHK Mizukami İstasyonu										671 MHz (44. Kanal)
		NHK STRL Binası	Tokyo									581 MHz (31. Kanal)
8K	Güney Kore	KBS Teknik Araştırma Kurumu Binası	Yeoeuido (Seul)	-	6 MHz	2k GI=1/16 256 QAM FEC = 3/4 MIMO	50.475 Mbit/s	50.0 Mbit/s	HEVC	-	-	785 MHz (64. Kanal)
4K	Güney Kore	Gwanaksan	Seul'un Güney Bölgeleri	DVB-T2	6 MHz	32k GI=1/16 256 QAM FEC=3/4, 4/5, 5/6 Pilot Pattern=PP4	<33.0 Mbit/s	25-34 Mbit/s	HEVC	3840×2160p Kare Hızı= 60 fps Bit D= 8-10 bits/piksel	MPEG-4 AAC 600 kbit/s	701 MHz (51. Kanal)
		Namsan	Seul'un Merkezi									761 MHz (61. Kanal)
		Yongmunsan	Seul'un Batı Bölgeleri									707 MHz (52. Kanal)
4K	Fransa	Eyfel Kulesi	Paris	DVB-T2	8 MHz	32k GI=1/128 256 QAM FEC=5/6 Pilot Pattern=PP7	40.2 Mbit/s	21.5 Mbit/s ve 17.5 Mbit/s olmak üzere iki farklı program taşınmıştır.	HEVC	3840×2160p Kare Hızı= 50 fps Bit D= 8 bits/piksel	HE-AAC 192 kbit/s	514 MHz (24. Kanal)

Ek 1 Sayısal Karasal Yayın Teknolojileri ile H.265/HEVC Teknolojisinin Birlikte Kullanımına İlişkin Dünya Örnekleri (devam)

Tür	Ülke	Verici İstasyonu	Kapsama Alanı	Sayısal Karasal Yayın Sistemi	Kanal Bant Genişliği	İletim Modu	Multiplex Kapasitesi	Sinyal Bit Oranı	Video Kodlama Teknolojisi	Çerçeve Özellikleri	Ses Kodlama Standardı	Kullanılan Merkez Frekansı
4K	İsveç	Stockholm	Stockholm	DVB-T2	8 MHz	32k GI=19/256 256 QAM FEC=3/5 Pilot Pattern=PP4	31.7 Mbit/s	23.0 Mbit/s	HEVC	3840×2160p Kare Hızı= 29.97 fps Bit D= 8 bits/piksel	-	618 MHz (39. Kanal)
4K	Birleşik Krallık	Crystal Palace	Londra'nın Büyük Bölümü	DVB-T2	8 MHz	32k GI=1/128 256 QAM FEC=2/3 Pilot Pattern=PP7	40.2 Mbit/s	33.0 Mbit/s	HEVC	3840×2160p Kare Hızı= 50 fps & 3840×2160p Kare Hızı= 59.94 fps Bit D= 8-10 bits/piksel	-	586 MHz (39. Kanal)
		Winter Hill	İngiltere'nin Kuzey Batısı Manchester & Liverpool									602 MHz (37. Kanal)
		Black Hill	İskoçya'nın Merkezi Glasgow & Edinburg									586 MHz (33. Kanal)
4K	İspanya	ETSI Binası	Ciudad (Madrid)	DVB-T2	8 MHz	32k GI=1/128 64 QAM FEC=2/3 Pilot Pattern=PP7	34.72 Mbit/s	33.0 Mbit/s	HEVC	3840×2160p Kare Hızı= 50 fps Bit D= 8 bits/piksel	E-AC-3 3.1	754 MHz (54. Kanal)

GI = Koruma Oranı

PP = Pilot Pattern

Bit D = Bit Derinliği

H.264/AVC = Advanced Video Coding

HE-AAC= High Efficiency Advanced Audio Coding

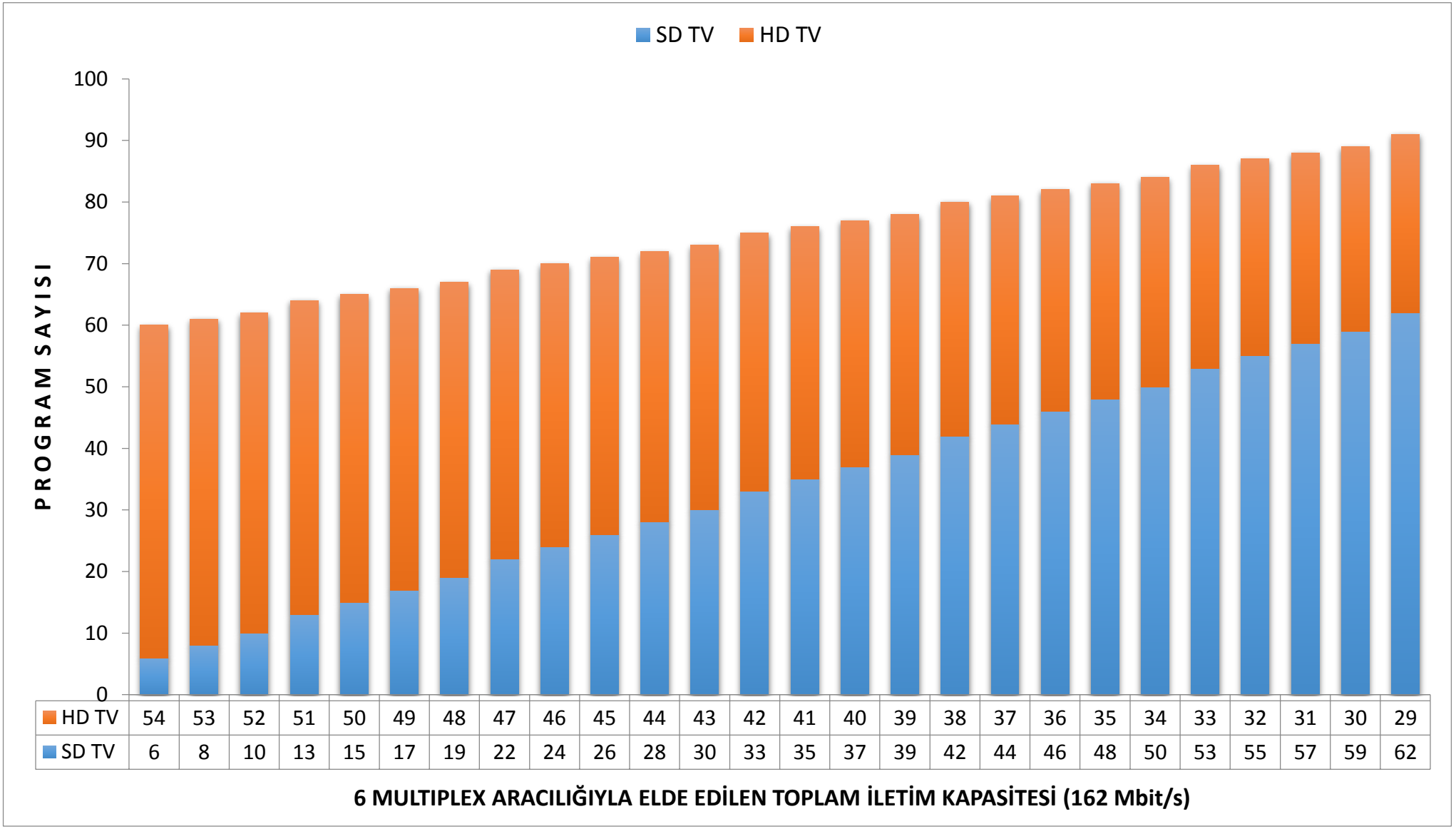
HEVC = High Efficiency Video Coding

FEC = Forward Error Correction

AAC = Advanced Audio Coding

QAM = Quadrature Amplitude Modulation

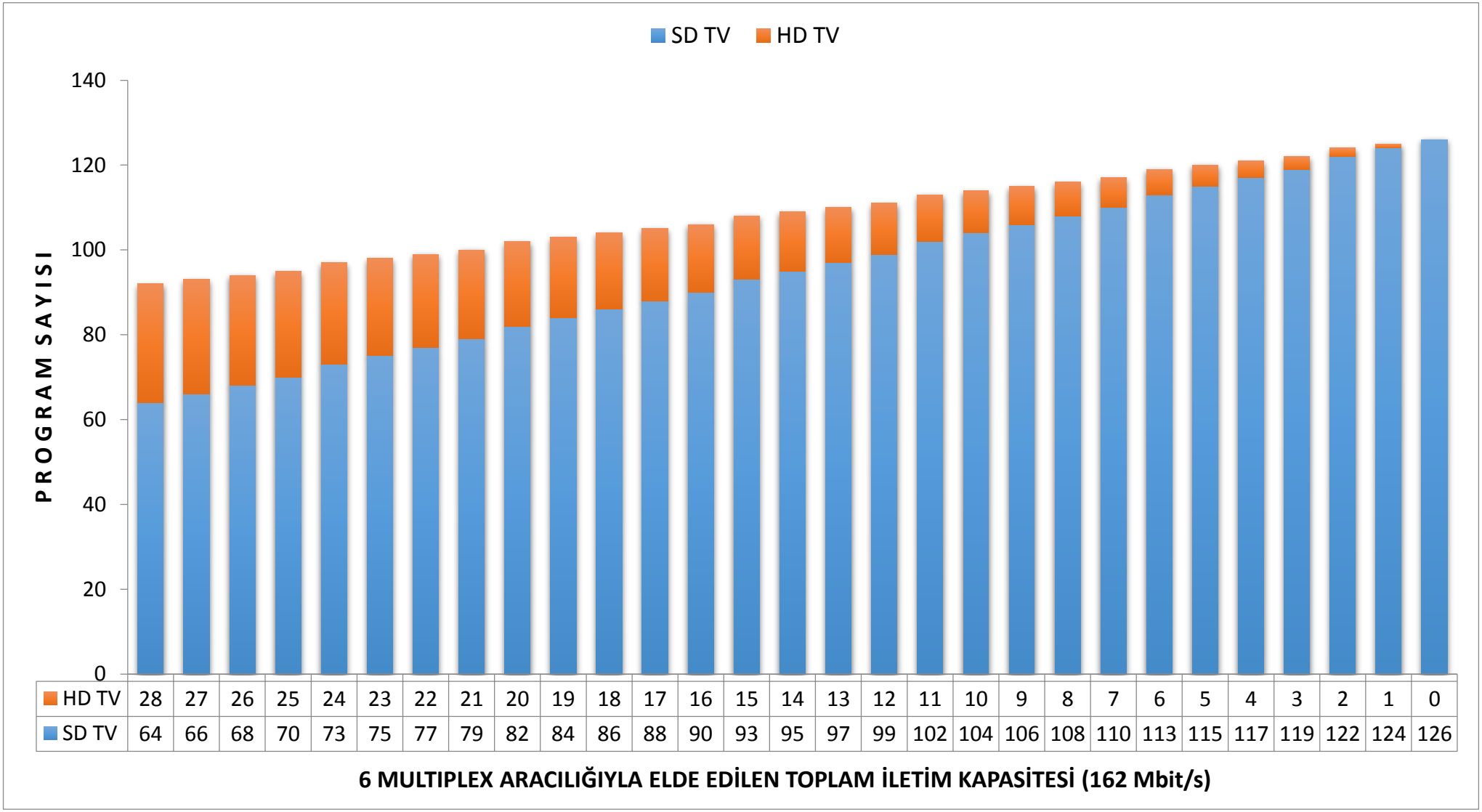
Ek 2 H.265/HEVC ile Sıkıştırılmaları Durumunda 6 Multiplex Aracılığıyla İletilebilecek SD ve HD (720p/50) Yayın Sayıları



HD TV	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29
SD TV	6	8	10	13	15	17	19	22	24	26	28	30	33	35	37	39	42	44	46	48	50	53	55	57	59	62

6 MULTIPLEX ARACILIĞIYLA ELDE EDİLEN TOPLAM İLETİM KAPASİTESİ (162 Mbit/s)

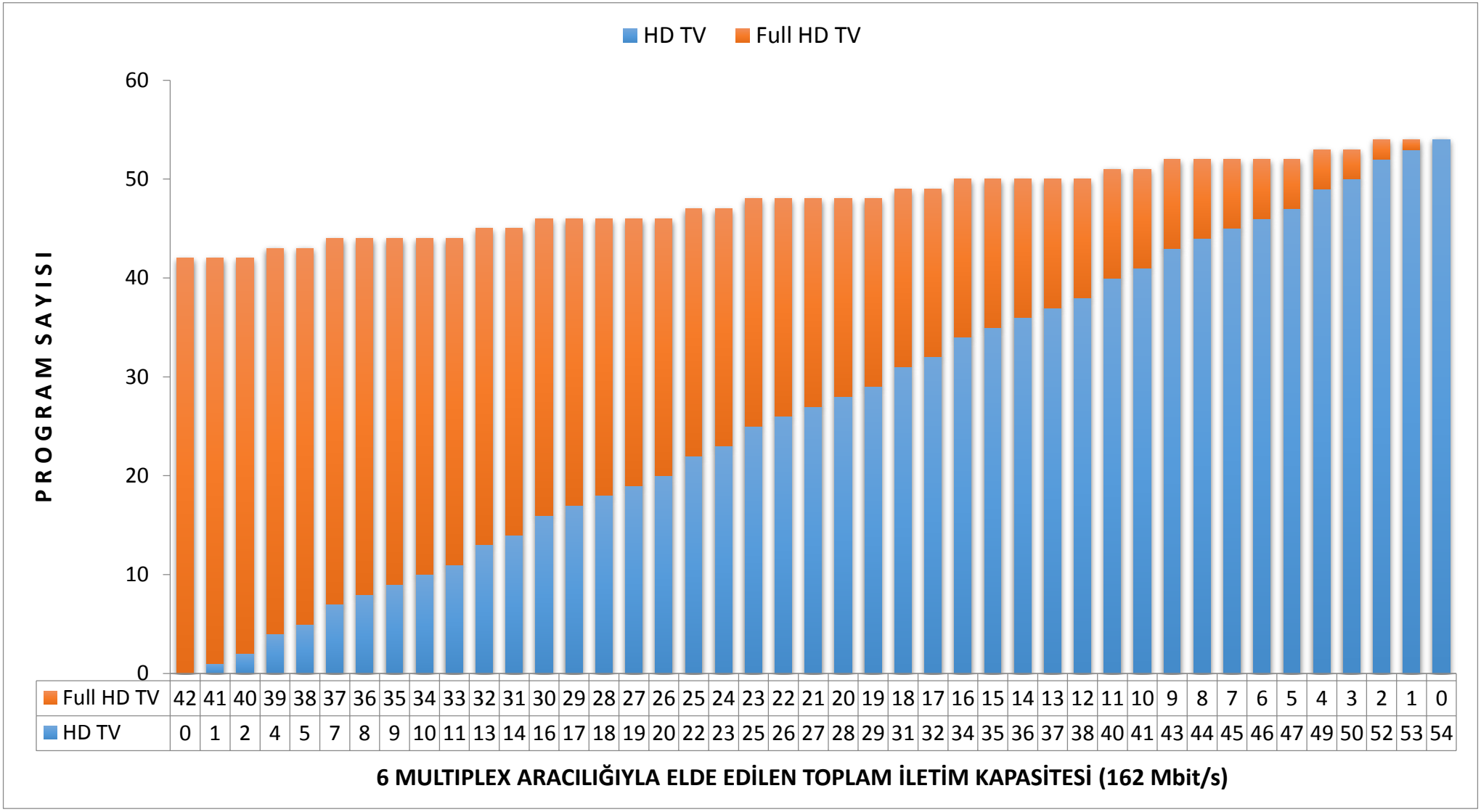
Ek 2 H.265/HEVC ile Sıkıştırılmaları Durumunda 6 Multiplex Aracılığıyla İletilebilecek SD ve HD (720p/50) Yayın Sayıları (devam)



HD TV	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SD TV	64	66	68	70	73	75	77	79	82	84	86	88	90	93	95	97	99	102	104	106	108	110	113	115	117	119	122	124	126

6 MULTIPLEX ARACILIĞIYLA ELDE EDİLEN TOPLAM İLETİM KAPASİTESİ (162 Mbit/s)

Ek 3 H.265/HEVC ile Sıkıştırılmaları Durumunda 6 Multiplex Aracılığıyla İletilebilecek HD (720p/50) ve Full HD (1080p/50) Yayın Sayıları



| | | |

ÖZET

Analog yayıncılıktan sayısal yayıncılığa geçişin başladığı 1990'lı yıllardan itibaren frekans spektrumu daha verimli kullanılsa da artan veri boyutu sıkıştırma teknolojilerine duyulan gereksinimi artırmıştır.

Bu noktada, 1990'lı yıllara kadar kullanılan kayıpsız sıkıştırma teknolojileri yetersiz kalmış ve uluslararası kuruluşlar tarafından kayıplı sıkıştırma teknolojileri geliştirilmiştir. Görüntü sıkıştırmak için JPEG, JPEG2000 ve JPEGXR; ses sıkıştırmak için MP3, AAC ve HE-AAC; video sıkıştırmak için MPEG-2, H.264/AVC ve H.265/HEVC teknolojileri öne çıkmıştır.

Sayısal televizyon yayıncılığında HD görüntü teknolojisinin kullanılması H.264/AVC aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak, H.264/AVC teknolojisi son yıllarda artan yüksek çözünürlüğe sahip yayınların iletimi noktasında yetersiz kalmış ve bunun üzerine JVT grubu tarafından H.265/HEVC teknolojisi geliştirilmiştir.

Her geçen gün artan yayıncı sayısının yanı sıra 4K ve 8K görüntü teknolojilerinin yakın gelecekte sayısal televizyon yayıncılığında kullanılacak olması frekans spektrumunda yoğunluğa neden olacaktır. Bu sorunun çözümü için H.265/HEVC teknolojisinin önemli bir çözüm olacağı değerlendirilmektedir.

H.265/HEVC teknolojisinin kablo, karasal ve uydu ortamından aktarılan yayınların sıkıştırılması için kullanılması durumunda mevcut durumda iletilen yayın sayısı yaklaşık olarak iki katına çıkacaktır. Bu bağlamda, yayıncılık alanında faaliyet gösteren kurum ve kuruluşların H.265/HEVC teknolojisinin kullanımına yönelik gereken adımları atmalarının ülke menfaatleri için uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Sayısal yayıncılık alanında faaliyet gösteren kurum, kuruluş ve kişilere yol gösterici olacağı düşünülen bu tez çalışması, H.265/HEVC teknolojisinin sayısal

televizyon yayıncılığına etkisinin yanı sıra dünya genelinde gerçekleştirilen güncel çalışmalara ışık tutmuştur.

ARŞİV Kayıt Bilgileri

Tezin Adı	Sayısal Televizyon Yayıncılığında Sıkıştırma Teknolojileri ve Uygulamaları
Tezin Yazarı	Musa AKAR
Tezin Danışmanı	Uğur BOĞA
Tezin Konumu	Uzmanlık Tezi
Tezin Tarihi	Haziran 2017
Tezin Alanı	Yayıncılık
Tezin Yeri	RTÜK – ANKARA
Anahtar Kelimeler	Sıkıştırma Teknolojileri, Sayısal Televizyon Yayıncılığı, H.265/HEVC, H.264/AVC, JPEGXR, HE-AAC, HD, 4K, DVB-T2, DVB-S2

ABSTRACT

In spite of frequency spectrum usage become much more efficient since the beginning of transition from analogue broadcasting to digital Broadcasting in 1990s, increase of data size had enhanced the need of compression technologies.

At this point, lossless compression technology used up to 1990s were inadequate and lossy compression technologies developed by international organizations. To compress images JPEG, JPEG2000 and JPEGXR; to compress audio MP3, AAC and HE-AAC; to compress video MPEG-2, H.264/AVC and H.265/HEVC technologies has come to the fore.

The use of HD technology in digital television broadcasting, H.264/AVC was carried through. However, H.264/AVC technology has fallen to transmission of high definition broadcasts which are increasing in recent years and at that point H.265/HEVC technology was developed by JVT group in 2013.

Growing with each passing day the number of publishers, as well as 4K and 8K image technology to be used for digital television broadcasting in the near future technologies will cause density in the frequency spectrum. To solve this problem, H.265 / HEVC technology has emerged as an important solution.

If H.265/HEVC technology is uses to compress broadcasts which are transmitted by cable, terrestrial and satellite, the number of broadcast currently being transmitted will be approximately doubled. In this context, the organizations and institutions which are active in broadcasting field, take the necessary steps toward the use of H.265/HEVC technology for our country’s interests is considered to be appropriate.

Institutions, organizations and individuals that operate in the field of digital broadcasting which are thought to be guiding in this thesis, the impact of

H.265/HEVC technology on digital television broadcasting as well as recent studies conducted across the world has shed light on.

Key Words: Compression Technologies, Digital Television Broadcasting, H.265/HEVC, H.264/AVC, JPEGXR, HE-AAC, HD, 4K, DVB-T2, DVB-S2

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında İstanbul'da doğan Musa AKAR, ilköğrenimini Mimar Sinan İlköğretim Okulu'nda, ortaöğrenimini ise Gebze Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2007 - 2012 yılları arasında Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimi aldı. 2013 yılında Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne Enerji ve Otomasyon Mühendisi olarak atandı. Radyo ve Televizyon Üst Kurulu'nun açmış olduğu sınavda başarılı olarak 2013 yılı Mart ayında Üst Kurul Uzman Yardımcısı olarak göreve başladı.

2015 yılında başlamış olduğu Gazi Üniversitesi Hukuk Fakültesi'nde lisans eğitimine devam etmekte olan AKAR, evli olup iyi derecede İngilizce bilmektedir.