T.C.

RADYO VE TELEVİZYON ÜST KURULU

SPEKTRUM YÖNETİMİNDE BLOK ZİNCİR YAKLAŞIMLARI: KARASAL YAYINCILIK BANDINDA SPEKTRUM PAYLAŞIMI

UZMANLIK TEZİ

ZEYNEP NUR BAHADIR

ANKARA

ARALIK, 2022


RTÜK
RADYO VE TELEVİZYON ÜST KURULU

T.C.
RADYO VE TELEVİZYON ÜST KURULU

SPEKTRUM YÖNETİMİNDE BLOK ZİNCİR YAKLAŞIMLARI: KARASAL YAYINCILIK BANDINDA SPEKTRUM PAYLAŞIMI

UZMANLIK TEZİ

ZEYNEP NUR BAHADIR

DANIŞMAN: ÜST KURUL UZMANI AHMET GEVRİ

ANKARA

ARALIK, 2022

Radyo ve Televizyon Üst Kurulu Başkanlığına,

Zenep Nur BAHADIR adlı Üst Kurul Uzman Yardımcısının hazırladığı “Spektrum Yönetiminde Blok Zincir Yaklaşımları: Karasal Yayıncılık Bandında Spektrum Paylaşımı” başlıklı bu çalışma Tez Değerlendirme Komisyonu üyelerince oy birliği / oy çokluğu ile **Uzmanlık Tezi** olarak kabul edilmiştir.

	Komisyon Üyeleri	İmza
Başkan	Ebubekir ŞAHİN Üst Kurul Başkanı	……..
Üye	Deniz GÜÇER Üst Kurul Üyesi	……..
Üye	Dr. İbrahim USLU Üst Kurul Başkan Yardımcısı	……..
Üye	Deniz GÜLER Daire Başkanı	……..
Üye	Ahmet GEVRİ Üst Kurul Uzmanı (Tez Danışmanı)	……..

ONAY

Bu tez Radyo ve Televizyon Üst Kurulu Uzmanlığı Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca …/…/20... tarihinde kabul edilmiştir.

Ebubekir ŞAHİN
Üst Kurul Başkanı

ETİK İLKELERE UYGUNLUK BEYANI

Bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,

Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,

Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,

Sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. 20/12/2022

Zeynep Nur BAHADIR

Üst Kurul Uzman Yardımcısı

TEŞEKKÜR

"Spektrum Yönetiminde Blok Zincir Yaklaşımları: Karasal Yayıncılık Bandında Spektrum Paylaşımı" isimli bu tezin hazırlanması sürecine ilişkin olarak Radyo ve Televizyon Üst Kurulunun değerli Başkanı ve Üyelerine, Üst Kurul Başkan Yardımcıları Sayın İbrahim USLU ve Sayın Orhan ÖZDEMİR'e, İzin ve Tahsisler Dairesi Başkanı Sayın Aydın DEMİR ve Daire Başkan Yardımcıları Sayın Ali SARI ve Sayın Yasin YİĞİT'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince bilgisi, tecrübesi ve tavsiyeleriyle beni destekleyen tez danışmanım Üst Kurul Uzmanı Sayın Ahmet GEVRİ'ye ve değerli mesai arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Baştan sona tezimin tüm süreçlerinde desteğini esirgemeyen değerli nişanlım Ali GÖKDEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

SPEKTRUM YÖNETİMİNDE BLOK ZİNCİR YAKLAŞIMLARI: KARASAL YAYINCILIK BANDINDA SPEKTRUM PAYLAŞIMI

BAHADIR, Zeynep Nur
Uzmanlık Tezi
Tez Danışmanı: Üst Kurul Uzmanı Ahmet GEVRİ
Aralık, 2022, Sayfa Sayısı 140

Kablosuz iletişimde bilgi elektromanyetik dalgalarla aktarılmaktadır. Bilim insanları, genellikle yayılma özelliklerine göre sınıflara ayrılan elektromanyetik radyasyon frekanslarının tüm aralığını belirtmek için "elektromanyetik spektrum" ifadesini kullanır. Elektromanyetik spektrum tükenmeyen, depolonamayan, kıt bir kaynaktır. Spektrum kullanımında verimliliğini artırmak için yeni araçlar arayışı, tüm dünyadaki araştırmacıları spektrum paylaşımı için yenilikçi kavramlar bulmaya motive etmiştir. Bilindiği üzere WRC-2019 ile birlikte hâlihazırda karasal televizyon yayıncılığında kullanılmakta olan 470-694 MHz frekans aralığının IMT servisi için değerlendirilmesi hususu bir sonraki toplantı olan WRC-2023'ün gündem maddeleri arasına girmiştir. Bu noktada WRC toplantılarında alınan son kararlardan görülebileceği üzere RTÜK iznine tabi olan spektrumun bir kısmı, sayısal yayıncılığa geçileceği planlanarak farklı hizmetlere tahsis edilmektedir. Ülkemizde karasal yayıncılık bandının yönetiminde düzenleyici kuruluş olarak yer alan RTÜK'ün bantta gerçekleşebilecek olan değişikliklere yönelik proaktif olarak çalışmalar yapması ve bandın geleceğine yönelik alınan kararları uygulama aşamasında esnek davranabilmesi önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında RTÜK iznine tabi karasal yayıncılık bandında uygulanabilecek spektrum paylaşımı teknikleri blok zincir teknolojisinin faydaları ışığında değerlendirilmiştir. Bu hususta öncelikle modern spektrum paylaşımı yaklaşımları göz önünde bulundurulmuş, devamında bu yaklaşımların düzenleyici bakış açısıyla nasıl incelenmesi gerektiği hususu detaylandırılmıştır. Düzenleyici çerçevede yer alan LSA, SAS ve CBRS gibi hizmetler incelenmiş ve bu hizmetlerin karasal yayıncılık bandına uyarlanabilecek kısımları belirtilmiştir. Ayrıca dağıtık defter teknolojisinin bir alt kümesi olan blok zincir teknolojisinin spektrum paylaşımına uygulanmasına yönelik kilit kavramlar belirtilmiş, bu kilit kavramların dinamik spektrum paylaşımı yaklaşımlarıyla

uygulanabilirliği incelenmiştir. Devamında ise blok zincir tabanlı spektrum paylaşımına yönelik iki ayrı yaklaşım ele alınmış ve bu yaklaşımlarla alakalı tartışmaların üzerinde durulmuştur. Blok zincir teknolojisinin özellikleriyle spektrum paylaşımı modelleri arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: spektrum yönetimi, spektrum paylaşımı, blok zincir teknolojisi, dağıtık defter teknolojisi

ABSTRACT

BLOCKCHAIN APPROACHES IN SPECTRUM MANAGEMENT: SPECTRUM SHARING IN THE TERRESTRIAL BROADCASTING BAND

BAHADIR, Zeynep Nur

Specialization Thesis

Thesis Advisor: Supreme Council Expert Ahmet GEVRİ

December, 2022, 140

In wireless communication, information is transferred by electromagnetic waves. Scientists use the term "electromagnetic spectrum" to denote the entire range of electromagnetic radiation frequencies, which are often classified according to their propagation properties. The electromagnetic spectrum is an inexhaustible, non-storable, scarce resource. The search for new tools to increase efficiency in spectrum use has motivated researchers all over the world to come up with innovative concepts for spectrum sharing. As it is known, together with WRC-2019, the evaluation of the 470-694 MHz frequency range, which is currently used in terrestrial television broadcasting, for the IMT service was among the agenda items of the next meeting, WRC-2023. At this point, as can be seen from the final decisions taken at the WRC meetings, a part of the spectrum that is subject to RTÜK's permission is allocated to different services, with a plan to switch to digital broadcasting. It is important for RTÜK, which is the regulatory agency in the management of the terrestrial broadcasting band in our country, to work proactively about the changes that may occur in the band and to be flexible in the implementation of the decisions taken for the future of the band.

In this thesis study, spectrum sharing techniques that can be applied in the terrestrial broadcasting band subject to RTÜK permission are evaluated in the light of the benefits of blockchain technology. In this regard, first of all, modern spectrum sharing approaches were taken into consideration, and then the issue of how these approaches should be examined from a regulatory perspective was detailed. Services such as LSA, SAS and CBRS in the regulatory framework were examined and the parts of these services that could be adapted to the terrestrial broadcasting band were specified. In addition, key concepts for the

application of blockchain technology, which is a subset of distributed ledger technology, to spectrum sharing have been specified, and the applicability of these key concepts with dynamic spectrum sharing approaches has been examined. Afterwards, two different approaches to blockchain-based spectrum sharing are discussed and discussions about these approaches are emphasized. Comparisons were made between the features of blockchain technology and spectrum sharing models.

Key Words: spectrum management, spectrum sharing, blockchain technology, distributed ledger technology

İÇİNDEKİLER

ETİK İLKELERE UYGUNLUK BEYANI iii
TEŞEKKÜR iv
ÖZET v
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER ix
TABLOLAR DİZİNİ xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiv
KISALTMALAR/SİMGELER xvi
GİRİŞ 1
Problem 1
Amaç 1
Önem 2
Sınırlılıklar 2
Tanımlar 3
Yöntem 3
Verilerin Toplanması 3
Verilerin Çözümlenmesi 4
BÖLÜM 1 5
1.SPEKTRUM YÖNETİMİNİN AMAÇ VE HEDEFLERİ 5
1.1 Radyo Dalgaları 7
1.1.1 Tarihsel Süreç 7
1.1.2 Elektromanyetik Spektrum 8
1.1.3 Radyo Spektrumu 10
1.2 Spektrum Yönetiminin Temel Elementleri 11
1.2.1 Yasal ve Düzenleyici Kuruluşlar 12
1.2.2 Spektrum Planlama ve Tahsis 12
1.2.3 Spektrum Mühendisliği 12
1.2.4 Yönetmelikler ve Standartlar 12
1.2.5 Frekans Koordinasyonu ve Bildirimi 13
1.2.6 Lisanslama, Atama ve Ücretlendirme 13
1.2.7 Kanun Yaptırımları 13

1.2.8.Spektrum Takibi 13
1.3 Spektrum Yönetiminde Uluslarası İlişkiler 14
1.4 Ülkemizde Karasal Yayıncılık Spektrumunun Yönetimi 18
1.4.1 Karasal Yayıncılık 18
1.4.1.1 Analog Yayıncılık 20
1.4.1.2 Sayısal Yayıncılık 21
1.4.2 Karasal Yayıncılıkta Spektrumun Değeri 23
1.4.3 Ülkemizde Karasal Yayıncılık Bandının Yönetimi 26
1.5 Sayısal Pay (Digital Dividend) Nedir? 26
1.5.1 Sayısal Pay (Digital Dividend) Spektrumunun Boyutu 29
1.5.2 Sayısal Pay Spektrumunun Potansiyel Kullanım Alanları 29
1.6 Spektrum Paylaşımı 33
1.6.1 Hangi Bantlar Paylaşılabilir? 35
1.6.2 Spektrum Paylaşımının İdari Yönetimi 36
1.6.3 Mimarilerine Göre Spektrum Paylaşımı Teknikleri 36
1.7 Spektrum Yönetimi Ekonomisi 37
1.7.1 Spektrum Yönetiminin Ekonomik İlkeleri 39
1.7.2 Spektrum Ticareti 40
BÖLÜM 2 42
2.BLOK ZİNCİR TEKNOLOJİSİ 42
2.1 Blok Zincir Teknolojisine Genel Bakış 42
2.1.1 Blok Zincir Nasıl Ortaya Çıktı? 42
2.1.2 Bitcoin ve Kripto Paralar 43
2.2 Blok Zincirde Temel Yapı Taşları 44
2.2.1 Blok Zincir ile Kayıt Sistemi 44
2.2.1.1 Blok Nedir? 45
2.2.1.2 Blok Yapısı 46
2.2.1.3 Sürüm (Version) 46
2.2.1.4 Önceki Blok Hash'i (Previous Block's Hash) 47
2.2.1.5 Merkle Kökü (Merkle Root) 47
2.2.1.6 Zaman Damgası (Time Stamp) 47
2.2.1.7 Zorluk Derecesi(Diffuculty Parameter) 48
2.2.1.8 Nonce Alanı 48

2.3 Blok Zincirde Güvenlik 48
2.3.1 Kriptoloji ve Hash 50
2.3.2 Merkle Ağacı Yapısı 51
2.4 Madencilik (Mining) 53
2.4.1 İş İspatı(PoW) 54
2.3.3 Blok Zincirde Yapısal Güvenlik 55
2.4.2 Pay İspatı(PoS) 56
2.5 Dağıtık Defter Teknolojisi (Distrubuted Ledger Technology) 56
2.5.1 Dağıtık Kayıt Yapısı ve Güvenlik 57
2.5.1.1 İzinsiz (Permissionless) Blok Zincir 58
2.5.1.2 İzinli (Permissioned) Blok Zincir 59
2.5.1.3 İzinli ve İzinsiz Dağıtık Defterler Arasındaki Benzerlik ve Farklılıklar 59
2.6 Blok Zincir Teknolojisine Bütüncül Bir Bakış 60
2.6.1 Blok Zincir Teknolojisinin Temel Özellikleri 62
2.6.1.1 Ademi Merkeziyetçilik 62
2.6.1.2 Şeffaflık 62
2.6.1.3 Değişmezlik 62
2.6.1.4 Erişilebilirlik 63
2.6.1.5 Güvenlik 63
2.6.2 Blok Zincir Teknolojisinin Sınırlamaları 64
2.6.2.1 Gizlilik Eksikliği 64
2.6.2.2 Yüksek Maliyet 65
2.6.2.3 Güvenlik Modeli 65
2.6.2.4 Esneklik Sınırlamaları 65
2.6.2.5 Yönetim ve Gizli Merkeziyetçilik 66
2.6.2.6 Kritik Boyut 66
2.6.2.7 Yasal Kabul Eksikliği 67
2.6.2.8 Kullanıcı Kabulü Eksikliği 67
2.7 Blok Zincir Teknolojisinden Etkilenebilecek İş Alanları 68
BÖLÜM 3 71
3.KARASAL YAYINCILIK BANDI SPEKTRUM PAYLAŞIMINDA BLOKZİNCİR YAKLAŞIMLARI 71
3.1 Spektrum Yönetimine Dair Modern Yaklaşımlar 71
3.1.1 Dinamik Spektrum Erişimi 72

3.1.2 Birden Çok Birincil ve İkincil Kullanıcıyla Dinamik Spektrum Paylaşımı 74
3.2 Spektrum Paylaşım Modellerinin Düzenleyici Bakış Açısıyla Değerlendirilmesi 77
3.2.1 Başarılı Bir Spektrum Paylaşım Modeli İçin Düzenleyicilerin Kriterleri 80
3.2.1.1 Verimli Spektrum Kullanımı 80
3.2.1.2 Girişimden Korunma 81
3.2.1.3 Sistemlerin Teknolojisine Minimum Etki 81
3.2.1.4 Güvenilir Erişim ve Kullanım Koşulları 82
3.2.1.5 Düzenleyici Makamlar Tarafından Uygulama ve Yaptırım 82
3.2.1.6 Adalet ve Rekabetten Yararlanma 83
3.2.1.7 Yasal ve Operasyonel Kesinlik 83
3.2.1.8 İnovasyon Teşviki 83
3.3 Blok Zincir Teknolojisinin Spektrum Paylaşımına Uygulanması 84
3.3.1 Blok Zincir Tabanlı Dinamik Spektrum Paylaşımı için Kilit Kavramlar 84
3.3.1.1 Güvenli Spektrum Defteri 84
3.3.1.2 Akıllı Sözleşmeler 86
3.3.1.3 Spektrum Ticareti Mekanizması 88
3.3.2 Dinamik Spektrum Paylaşımı İçin Dağıtılmış Defterler 89
3.3.2.1 Spektrum Varlıkları ve Ödeme Modeli 92
3.3.2.2 Yönetişim 93
3.3.2.2 DLT Sisteminin Operasyonel Katmanları 96
3.3.3 Blok Zincir Tabanlı Spektrum Paylaşımı Yaklaşımları 98
3.3.3.1 Yrjöla'nın CBRS Hizmetinde Blok Zincir Kullanımı Yaklaşımı 99
3.3.3.2 Blok Zincir Token Tabanlı Spektrum Ticareti Yaklaşımı 105
3.3.4 Blok Zincir ile Spektrum Paylaşımına Dair Tartışmalar 109
3.3.4.1 Birincil İşbirlikçi Paylaşım 111
3.3.4.2 İkincil İşbirlikçi Paylaşım 113
3.3.4.3 İkincil İşbirlikçi Olmayan Paylaşım 113
3.3.4.4 Birincil İşbirlikçi Olmayan Paylaşım 114
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 115
Sonuçlar 115
Öneriler 126
KAYNAKLAR 129
ÖZGEÇMİŞ 140

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo **Sayfa**

Tablo 1.1 Radyo Spektrumunda Yer Alan Frekans Alt Bantları 15

Tablo 1.2 ITU Bölge 1 Yayıncılık Frekans Bandları 18

Tablo 2.1 Bazı DLT Örnekleri 58

Tablo 3.1 Genel ve İzinli Blok Zincirlerinin Spektrum Paylaşımı İçin Faydaları ve Sınırlamaları 110

Tablo 3.2 Spektrum Paylaşımının Birincil Ve İkincil Lisanslı Olmak Üzere Farklı Modları 111

Tablo 4.1 Karasal Yayıncılık Bandında Spektrum Paylaşım Modeli Paydaşları……..….127

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1 Elektromanyetik Frekans Spektrumu 6

Şekil 1.2 Elektromanyetik Radyasyon Türleri 9

Şekil 1.3 Spektrum Yönetimi 1

Şekil 1.4 ITU Bölgeleri 16

Şekil 1.5 Yayıncılık Sistemi Şeması 22

Şekil 1.6 Karasal Yayın İletim Blok Şeması 24

Şekil 1.7 Sayısala Geçiş 27

Şekil 1.8 Sayısal Pay Spektrumu 28

Şekil 1.9 Spektrumun Yayılma Karakteristiği 32

Şekil 1.10 Spektrum Paylaşma Tekniklerinin Sınıflandırılması 37

Şekil 2.1 Blok Zinciri Veri Yapısı 45

Şekil 2.2 Bitcoin'in Blok Yapısı 46

Şekil 2.3 Mevcut Güven Mimarileri ve Blok Zincirin "Güvencesiz Güven" Mimarisi 49

Şekil 2.4 Sekiz ve Yedi Veriden Oluşan Merkle Ağaçları 52

Şekil 2.5 Teyit Edilecek İşlemin (12 no.lu işlem) Yolculuğu 53

Şekil 3.1 Dinamik Spektrum Erişim Stratejileri 72

Şekil 3.2 Spektrum Paylaşım Modellemesi 75

Şekil 3.3 Paylaşım Modellerindeki Farklı Seviyelere Genel Bakış 79

Şekil 3.4 Başarılı Bir Spektrum Paylaşım Modeli için Düzenleyicilerin Kriterleri 80

Şekil 3.5 Spektrum Defteri Gösterimi 85

Şekil 3.6 Spektrum Bloğu Mimarisi 86

Şekil 3.7 Akıllı Sözleşme Tabanlı Spektrum Algılama 87

Şekil 3.8 Akıllı Sözleşme Tabanlı DSS 89

Şekil 3.9 Spektrum Paylaşımı: Mevcut Durum ve DLT ile Potansiyeli 91

Şekil 3.10 DLT Sisteminin Aktörleri 93

Şekil 3.11 DLT Sistemi İçindeki Farklı Aktörlerin Etkileşimi 96

Şekil 3.12 Yurttaş Geniş Bant Radyo Hizmeti (CBRS) Kontrol Mimarisi 100

Şekil 3.13 Blok Zincir Kullanılarak Oluşturulan CBRS Hizmeti Sistem Şeması 104

Şekil 3.14 Merkezi Bir Spektrum Koordinatörü Tarafından Yönetilen İkincil Radyo Spektrum Ticareti 107

Şekil 3.15 USD ve Spektrum Dolar İşlem Akışları ile Önerilen İkincil Spektrum Piyasası Blok Diyagramı 108

Şekil 3.16 Birincil İşbirlikçi Spektrum Paylaşımı İçin Blok Zinciri 113

Şekil 4.1 Karasal Yayıncılık Bandında Spektrum Paylaşım Modellemesi……127

KISALTMALAR/SİMGELER

Kısaltma	Açıklama
5G	5th Generation
AB	Amerika Birleşik Devletleri
AB	Avrupa Birliği
API	Application Programming Interface
Ar-Ge	Araştırma-Geliştirme
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BTK	Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu
CBRS	Citizens Broadband Radio Service
CEPT	The European Conference of Postal and Telecommunicaitons Administrations
DAO	Decentralized Autonomous Organization
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DFS	Dynamic Frequency Selection
DLT	Distributed Ledger Technology
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
DTT	Digital Terrestrial Television
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
DVB-T2	Digital Video Broadcasting - Second Generation Terrestrial
ECB	European Central Bank
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ESC	Environmental Sensing Capability
FM	Frequency Modulation
GHz	Gigahertz
GPS	Global Positioning System
Hz	Hertz
ICT	Information and Communicaitons Technology
ICAO	International Civil Aviation Organization

IMO	International Maritime Organization
IMT	International Mobile Telecommunication
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial Scientific and Medical Band
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	The Radiocommunication Sector
KDKA	Amerikan Radyo Kanalı
LBT	Listen Before Talk
LSA	Licensed Shared Access
MHz	Megahertz
Nonce	Number Only Used Once
OFCOM	Office of Communications
PoS	Proof of Stake
PoW	Proof of Work
PU	Primary User
P2P	Peer to Peer
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
RSPG	Radio Spectrum Policy Group
RTÜK	Radyo ve Televizyon Üst Kurulu
SAS	Spectrum Access System
SC	Spectrum Coin
SD	Standart Definition
SDR	Software Defined Radio
SMA	Spectrum Management Authority
SSM	Secondary Spectrum Market
SU	Secondary User
TPC	Transmit Power Control
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
UHF	Ultra High Frequency
UWB	Ultra wide band
VHF	Very High Frequency
VoIP	Voice over Internet Protocol
WRC	World Radiocommunication Conference
WWJ	Amerikan Radyo Kanalı

GİRİŞ

Bu bölümde; problem, amaç, önem, sınırlılıklar, tanımlar, yöntem, verilerin toplanması ve verilerin çözümlenmesi alt başlıkları yer almaktadır.

Problem

Elektromanyetik spektrum tükenmeyen, depolonamayan, kıt bir kaynaktır. Ülkemiz adına uluslararası alanlarda elektromanyetik spektrumun kullanımından sorumlu kuruluş BTK olmakla birlikte, ulusal bazda yayıncılık alanından sorumlu kuruluş ise RTÜK'tür. Elektromanyetik frekans spektrumunda yer alan 87.5-108.0 MHz frekans aralıkları FM analog radyo, VHF III (174-230 MHz) karasal sayısal radyo (T-DAB ve DVB-T) ve VHF III (174-216 MHz), UHF IV/V (470-694 MHz) bantları karasal sayısal televizyon yayınları (DVB-T2) için olmak üzere RTÜK iznine tabidir. WRC-2019 ile birlikte hâlihazırda karasal televizyon yayıncılığında kullanılmakta olan 470-694 MHz frekans aralığının IMT servisi için değerlendirilmesi hususu bir sonraki toplantı olan WRC-2023'ün gündem maddeleri arasına girmiştir. WRC toplantılarında alınan son kararlardan görülebileceği üzere RTÜK iznine tabi olan spektrumun bir kısmı, farklı hizmetlere tahsis edilmektedir. Gelişen teknoloji ve spektrumu kullanan hizmetlerin gittikçe artması durumunun sayısal pay spektrumunun kullanımını daha önemli hale getireceği ayrıca spektrumun daha verimli kullanılmasına vurgu yapacağı değerlendirilmektedir. Bu çalışmada modern spektrum paylaşımı yöntemleri için blok zincir yaklaşımları incelenmiş ve RTÜK'ün karasal yayıncılık bandında blok zincir yaklaşımları kullanarak spektrumu diğer hizmetlerle paylaşabilme hususu değerlendirilmiştir.

Amaç

"Spektrum Yönetiminde Blok Zincir Yaklaşımları: Karasal Yayıncılık Bandında Spektrum Paylaşımı" adlı çalışmanın amacı, karasal yayıncılık bandında spektrumun daha verimli kullanılması adına blok zincir tabanlı modern spektrum paylaşımı yaklaşımlarını incelemektir. Gelişen teknoloji karasal yayıncılık için ihtiyaç duyulan spektrum miktarını azaltmış, spektruma ihtiyaç duyan hizmetlerin sayısını artırmıştır. Bu hususta WRC

toplantılarında alınan kararlar doğrultusunda, karasal yayıncılık bandının gitgide daralarak, başka hizmetlere tahsis edildiği görülmektedir. Çalışmada RTÜK yetkisinde olan karasal yayıncılık bandı için modern spektrum paylaşımı yaklaşımları blok zincir bakış açısıyla değerlendirilmiştir.

Önem

RTÜK iznine tabi olan karasal yayıncılık bandının, WRC toplantılarında alınan kararlar doğrultusunda, gitgide daralarak, başka hizmetlere tahsis edildiği görülmektedir. Bu durumun sebepleri ise gelişen teknoloji ile karasal yayıncılık için ihtiyaç duyulan spektrum miktarının azalması ve spektruma ihtiyaç duyan diğer hizmetlerin sayısının artırması olarak sayılabilir. RTÜK'ün bu gelişmeler bağlamında, yayıncılığa ait spektrumun kısıtlanmadan ya da verimsiz kullanımına yol açmadan, radyo ve televizyon yayıncılığının gelişimini desteklemesi önem arz etmektedir.

Bu hususta karasal yayıncılık bandında meydana gelebilecek potansiyel değişimleri takip etmek, bu değişimlerde söz sahibi olabilmek ve bu değişimlere yönelik esnek bir spektrum paylaşımı ortamına yönelik çalışmalar yapmak; radyo ve televizyon yayıncılığının gelişimi ve spektrum kaynağının verimli kullanımı ile yeni teknolojilere teşvik noktasında ciddi yararlar sağlayacaktır.

Sınırlılıklar

Tez çalışması kapsamında iki temel konu üzerinde durulmuştur. Bunlar spektrum yönetimi kavramı içinde yer alan spektrum paylaşımı ve blok zincir teknolojisidir. Bu iki ayrı kapsamlı konuda ayrıntıları eleyerek, yalnızca önemli detaylara yer vermek önem arz etmiştir. Blok zincirler Dağıtık Defter Teknolojileri'nin (DLT) bir alt kümesi olsa da, literatür çoğu DLT'yi blok zinciri olarak adlandırdığı için bu iki terim birbirinin yerine kullanılabilmektedir. Bu durum zaman zaman kavram karmaşası oluşturmaktadır. Literatürde spektrum paylaşımına yönelik blok zincir yaklaşımları genel anlamda incelenmiş, karasal yayıncılık bandına indirgenen bir kaynak bulunamamıştır. Bu husus blok zincir yaklaşımının bandın kendine has teknik özellikleri özelinde yeterince incelenememesine sebep olmuştur.

Tanımlar

Spektrum yönetimi; elektromanyetik radyasyonun tüm özellikleri gözetilerek, optimum sayıda ve türde hizmetin bir arada var olmasını sağlamak amaçlı, spektrumda sağlanan ulusal ve uluslararası düzeyde bir koordinasyondur (Stine & Portigal, 2004, s. 1).

Spektrum paylaşımı; Tuna ve Karagöz (2012) tarafından, spektrumda yönetme istemiyle seçilen bir kanala diğer kullanıcıların erişimi amacıyla koordinasyonun sağlanması ve iletim bandının paylaşılması işlemi olarak tanımlanmıştır (s. 29).

Karasal yayıncılık; Radyo ve televizyon yayıncılığında, yayını izleyiciye ulaştırmak amacıyla karasal ortam kullanılarak, yayın hizmetinin karasal verici sistemleri vasıtasıyla alıcılara iletilmesidir.

Blok zincir, en bilinen kripto para birimi olan Bitcoin'in de uygulanmasını sağlayan genel teknolojinin adıdır (Durukal, 2021, s. 7). Tarihsel kökeni 'dağıtık kayıt tutma' teknolojisine dayanan, bir veri tabanı olarakta tanımlabilmektedir.

Dağıtık defter teknolojisi, birden çok veri deposunda (veya defterlerde) verilerin kaydedilmesi ve paylaşılması için yeni ve hızla gelişen bir yaklaşımı ifade eder (World Bank Group, 2017, s. VII).

Yöntem

Bu çalışmada, literatürde yer alan dokümanlar "Kaynak Tarama Methodu" kullanılarak analiz edilmiştir. Bu doğrultuda, spektrum yönetimi ve blok zincir teknolojisi ile ilgili kaynaklar tezin üçüncü bölümü olan "Karasal Yayıncılık Bandı Spektrum Paylaşımında Blokzincir Yaklaşımları" kısmına temel oluşturabilecek şekilde tasnif edilmiştir.

Verilerin Toplanması

Tezin oluşturulması aşamasında kitaplar, ders notları, tez çalışmaları, akademik makaleler, yayınlanmış konferanslara ait bildiriler, dergiler, gazeteler, güncel haberler değerlendirilerek, bu veriler üzerinden yorumlar yapılmıştır. Kullanılan dokümanların güvenilir kaynaklar tarafından oluşturulmuş olmasına dikkat edilmiştir. Bu hususta özellikle

ITU, OFCOM, EC ve BTK gibi ulusal ve uluslararası otoritelerin kaynakları ön planda tutulmuştur.

Verilerin Çözümlenmesi

Araştırma süresince elde edilen dokümanlarda yer alan bilgiler öncelikle gözden geçirilmiş, bu veriler açık ve anlaşılır bir sıralama oluşturmak amacıyla başlıklar altında kategorize edilmiştir. Kategorize edilen bu başlıklar altında yer alan bilgiler ise konu bütünlüğünü sağlamak adına zaman zaman sınırlandırılmıştır. Tezin sonucunda ortaya konulan veriler ışığında, bütüncül yorumlamalar yapılmıştır.

BÖLÜM 1

1.SPEKTRUM YÖNETİMİNİN AMAÇ VE HEDEFLERİ

İçinde bulunduğumuz bilgi çağı, toplumun her seviyesinde bilginin ve her türlü bilgi taşıyıcısının sayısallaştırılmasını teşvik etmekte ve uygulamaya koymaktadır. Elektromanyetik dalgalar; bilgi iletimi için uygun bir ortam olarak kullanılmakla beraber en basit tanımıyla bir elektrik alan ile bir manyetik alan arasındaki titreşimlerin bir sonucu olarak oluşan dalgalardır ("What is Electromagnetic Waves? Definition of Electromagnetic Waves, Electromagnetic Waves Meaning," t.y.). Elektromanyetik spektrum maddi olmayan ancak kısıtlı bir kaynaktır. Buna rağmen tükenen veya kalitesi azalan bir kaynak değildir.

Günümüz dijitalleşen dünyasında spektrum kaynaklarına olan ihtiyaç gün gün artmaktadır. Ticari radyo, kablosuz telefon, televizyon, Küresel Konumlandırma Sistemleri (GPS'ler), Doppler Hava Durumu Radarı ve diğer kablosuz teknolojilerin yaygın varlığı, ortalama bir bireyin spektrum ile olan ilişkisini özetleyebilir (Stine & Portigal, 2004, s. 1). Ancak spektrum kaynaklarının mevcudiyeti sınırlıdır, bu durum mevcut spektrumun en verimli şekilde kullanılmasına yönelik bir ihtiyaç doğurmaktadır (Patil & Patil, 2016, s. 1).

Birden fazla yayılan sinyal, aynı fiziksel alanda bir arada var olacak şekilde tasarlanabilir ve ardından uygun ekipman ve kanal kullanılarak seçici olarak algılanabilir. Spektrum yönetiminin amacı, optimum sayıda ve türde hizmetin bir arada var olmasını sağlamaktır (Stine & Portigal, 2004, s. 1).

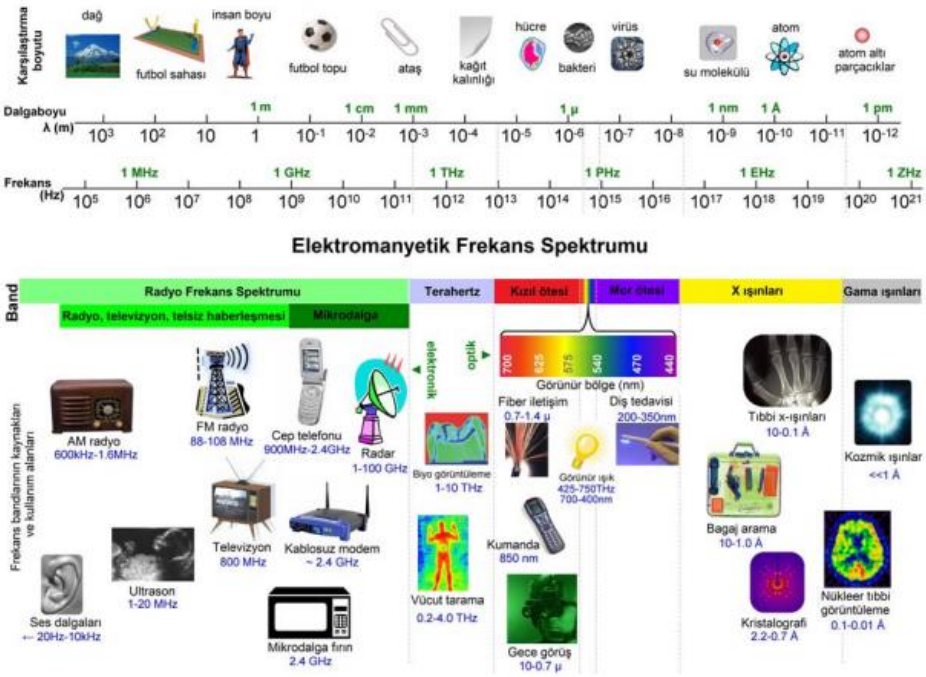
Radyo frekansı spektrumu, 9.000 Hz (9 kilohertz) ile 300.000.000.000 Hz (300 gigahertz) arasındaki elektromanyetik radyasyon frekanslarının sürekliliğidir. En basit anlamda, bu sürekliliğin farklı bantlarını farklı kullanıcılara tahsis ederek birden çok spektrum kullanıcısını izole etmek mümkün olabilmektedir. Bununla birlikte, spektrum yönetiminin, frekansları tahsis etmekten çok daha karmaşık olduğu değerlendirilmektedir. Spektruma olan ihtiyaç spektrum yönetiminde bu değerli ve kısıtlı kaynağın yeniden kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu hususta, iletimlerin diğer fiziksel özellikleri de spektrum kullanıcılarını izole etmek için kullanılabilmektedir. Spektrum yönetimi, elektromanyetik radyasyonun tüm özelliklerinin gözetimi olarakta tanımlanabilir. Amaç, spektrumun optimum kullanımına izin verirken, kullanıcıların zararlı parazitlerden etkilenmesini önlemektir. Ancak elektromanyetik radyasyonun özellikleri zamana, uzaya ve

frekansa göre değiştiği için sorun daha da karmaşık hale gelmektedir (Stine & Portigal, 2004, s. 1).

Yayıncılık ve mobil servisler gibi günlük hayatın vazgeçilmez uygulamaları dışında spektrumu kullanan birçok başka servis ve uygulama da vardır. Bunlar; uydu hizmetleri, seyrüsefer ve ulaşım, deniz iletişimi, kamu güvenliği hizmetleri, kısa menzilli cihazlar (örneğin, uzaktan kumandalı araba anahtarları), savunma sanayi uygulamaları ve bilimsel kullanımlar olarak sıralanabilir. Bütün bu sistemler elektromanyetik spektrumun bir kısmını kullanmaktadır. Spektrum düzenleyicileri, tüm gereksinimleri dengelemek ve spektrumun verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamakla görevlidir (Beutler, 2016, s. 34).

Şekil 1.1

Elektromanyetik Frekans Spektrumu Esnek Spektrum Yönetimi: Spektrum İhaleleri ve Spektrum Ticareti. Selek ve ark., 2010, s.2



Farklı telekomünikasyon sistemleri arasında parazitsiz şekilde bir arada işlerliği garanti etmek için spektrum kullanımı organize edilmelidir. Bu amaçla, elektromanyetik spektrum, yayın, mobil veya sabit hizmetler gibi belirli hizmetlerin belirli koşullar altında çalıştırılabileceği birçok banda bölünmüştür. Her türlü elektromanyetik spektrumun kullanımı sıkı bir şekilde düzenlenmiştir. Uluslararası, bölgesel ve ulusal düzenleme olmak

üzere üç farklı düzenleme düzeyi vardır. Her seviyede, spektrum kullanımı için kuralları belirleyen organizasyonlar bulunmaktadır (Beutler, 2016, s. 34).

1.1 Radyo Dalgaları

Tezin bu kısmında, spektrum yönetiminin temel elementi olan radyo dalgalarının tanınmasındaki tarihsel süreç, bu dalgaların belirli özelliklerine göre sınıflandırıldığı elektromanyetik spektrum ve son olarak vazgeçilmez bir kamu kaynağı olan radyo spektrumu anlatılmıştır. Bu başlıkların tezin devamı için altyapı oluşturacağı düşünülmektedir.

1.1.1 Tarihsel Süreç

Elektrik ve manyetizma on sekizinci yüzyıldan itibaren birçok bilim insanının etkilendiği konular arasına girmişti. Ancak elektrik ve manyetizma ile ilgili fenomenler birbirlerinden bağımsız olarak kabul edildiğinden, her zaman farklı araştırmaların konuları olmuştur. On dokuzuncu yüzyıl ise elektromanyetik teorinin dönüm noktası olarak kabul edilebilir (Schwap & Fischer, 1998, s. 1312-1318). Ancak 1820'de Andre-Marie Ampere (1775-1836) ve Hans Cristian Oersted (1777-1851), mıknatıslar ve elektrik akımları arasındaki bağlantıyı, yani elektriği manyetizmaya dönüştürme olasılığını ortaya koydu (Mikerov, 2014).

1864'te James Clerk Maxwell (1831-1879) elektromanyetik dalgaların varlığını matematiksel olarak öngördü ve elektromanyetik olayların tam bir tanımını sağladı. 1865'te yayınlanan Elektromanyetik Alanın Dinamik Teorisi adlı makalesi, elektromanyetik teorinin temeli olarak kabul edilir. Daha sonra, birçok deneyci Maxwell'in denklem sistemini derinlemesine araştırmaya başladı. Elektromanyetik teori tarihinde bir dönüm noktası, Heinrich Rudolf Hertz'in 1887'de Maxwell'in teorisinin temelini kanıtlayan, etkili bir şekilde radyo dalgaları ürettiği deneyler dizisiyle temsil edilir. Maxwell'in öngörüsünün doğrulanması, onun bu keşfinin bilim topluluğu tarafından genel kabul görmesine yardımcı olduğu kanısı yaygındır (Sengupta & Sarkar, 2003, s. 13). Maxwell ve Hertz'in (1857-1894) önemli katkıları, elektroniğin gelişmesiyle birleşerek kablosuz iletişimin yolunu açtı (Engineering and Technology History Wiki, 2020).

Guglielmo Marconi (1874-1937), kablosuz iletişimin gelişimi ile daha yakından bağlantılı olan mucittir. Kablosuz telgraf sistemiyle yaptığı öncü deneyler göz önüne alındığında, o zamanlar kablosuz telgraf olarak adlandırılan radyonun babası olarak kabul edilir. 1901'de, uzun mesafeli radyo iletişiminin uygulanabilirliğini kanıtlayan ilk transatlantik sinyali iletmeyi ve almayı başardı. Böylece, belirli bir frekans aralığını modüle ederek, fiziksel olarak birbirine bağlı olmayan iki veya daha fazla nokta arasındaki mesafeler üzerinden bilgi iletmenin mümkün olacağı ortaya çıkmıştır (Hatfield & Weiser, 2006, s. 3).

Devamında ticari, askeri ve deniz telsiz iletişimi geliştirilmeye başlandı. 1915'te New York ve San Francisco arasında ilk kablosuz ses iletim sistemi kuruldu ve 1920'de Detroit'teki WWJ ve Pittsburgh'daki KDKA istasyonları ile ilk ticari radyolar kuruldu. Televizyon yayıncılığı, mobil telefon, uydu iletimi; kablosuz iletişimin icat edilmesiyle zaman içinde ortaya çıkan yeniliklerin göz önünde olan örnekleridir (Cave vd., 2002, böl. 2).

Kablosuz hizmetler, toplumun örgütlenme ve bağlantı kurma şeklini kökten değiştirmesi ve insanların iletişim kurma biçiminde devrim yaratması bakımından telekomünikasyon alanında paha biçilmez bir başarıyı ve aynı zamanda sosyal ilerlemede ileriye doğru atılmış büyük bir adımı temsil etmektedir (Falciasecca & Vallotti, 2009).

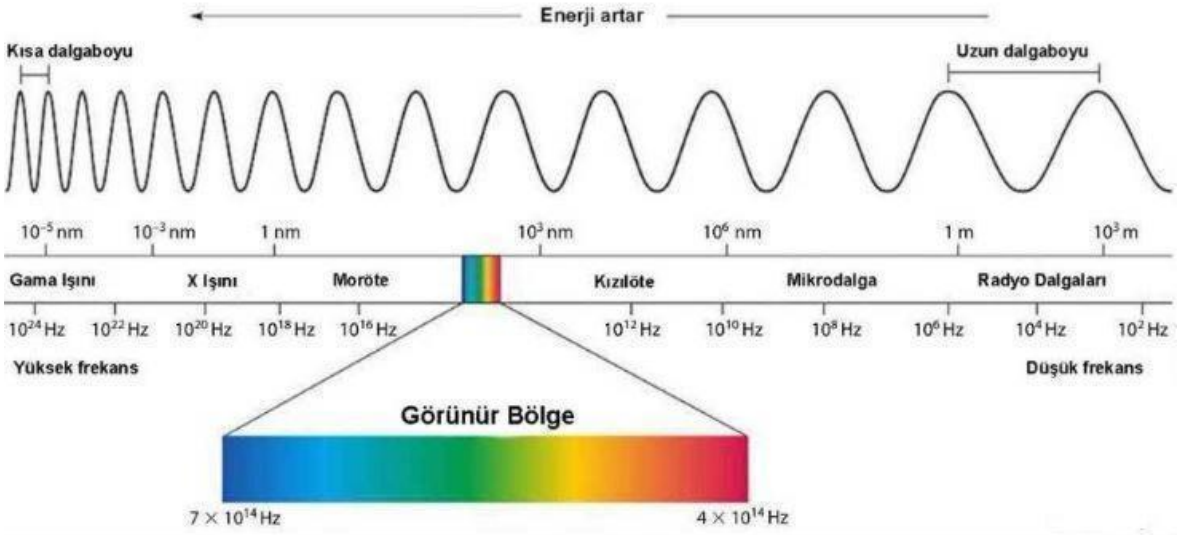
1.1.2 Elektromanyetik Spektrum

Kablosuz iletişimde bilgi elektromanyetik dalgalarla aktarılmaktadır. Elektromanyetik dalgalar ise elektrik ve manyetik alanların kendi kendine yayılan, karşılıklı salınımı olarak tanımlanabilirler. Spektrum yönetimi en geniş anlamıyla bir takım unsurlara sahiptir ve bir ulusun bunları ulusal altyapısının bir parçası olarak benimseme derecesi ihtiyaca göre değişiklik gösterebilmektedir. Aslında elektromanyetik dalgalar hem elektrik hem de manyetik alanlardan oluşur ve uzayda yapay bir kılavuz olmadan ışık hızında yayılırlar.

Bilim insanları, genellikle yayılma özelliklerine göre sınıflara ayrılan elektromanyetik radyasyon frekanslarının tüm aralığını belirtmek için "elektromanyetik spektrum" ifadesini kullanmaktadırlar (National Aeronautics and Space Administration, 2013). Elektromanyetik radyasyon, dalga benzeri bir düzende her biri ışık hızında uzayda seyahat eden, foton adı verilen kütlesiz parçacıkların bir akışı olarak tanımlanır. Her foton belirli bir miktarda enerji içermektedir.

Şekil 1.2

Elektromanyetik Radyasyon Türleri Elektromanyetik Spektrum: Gökyüzü Ne Renktir? Akbaba, 2021



Elektromanyetik radyasyon türleri enerji, dalga boyu ve frekans açısından birbirinden farklılık gösterir. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi, radyasyon en yüksek enerji/en yüksek frekans/en kısa dalga boyundan (gama ışınları) en düşük enerji/en düşük frekans/en uzun dalga boyuna (radyo dalgaları) doğru sıralanabilir (National Aeronautics and Space Administration, 2013).

Bir dalga tarafından taşınan enerji, bir tepenin bozulmamış konumundan, maksimum yer değiştirmesi olan bir dalganın genliği ile ilgilidir. Genlik arttıkça taşınan enerji miktarı da artar. Dalga boyu, bir elektromanyetik dalganın bir devinim süresi boyunca kat ettiği mesafe olarak tanımlanır ve metre cinsinden ölçülür. Bir devinimden kasıt tepeden tepeye kadar olan, eksiksiz değerler dizisidir. Frekans, genellikle bir saniye olmak üzere, birim zamanda meydana gelen devinim veya döngü sayısıdır ve hertz (saniyedeki döngü) olarak ifade edilir. Frekans ve dalga boyu matematiksel olarak birbirlerine ters orantılıdırlar. Frekans ne kadar yüksekse dalga boyu o kadar kısadır. Ancak frekans ve enerji doğru orantılıdır (National Aeronautics and Space Administration, 2013).

Elektromanyetik dalgaları telsiz iletişim ile bağdaştıran nokta yayılma özellikleri ve bilgi taşıma kapasiteleridir. Genel olarak, daha yüksek frekanslı dalgalar daha kısa mesafelere ulaşır ancak daha fazla miktarda bilgi taşıyabilir, daha düşük frekanslı dalgalar ise daha uzun mesafeler kat eder ancak bilgi taşıma kapasiteleri azdır. Elektromanyetik

dalgaların fiziksel özellikleri, farklı uygulamalar için uygun spektrum bantlarının belirlenmesine yardımcı olur (ITU, 2010, s. 10). Örneğin, geniş bant hizmetleri, daha büyük yayılma özelliklerine sahip olan spektrumun daha düşük kısımlarını talep eder. Bu özel dalgalar, binalar gibi engelleri aşma özelliğine sahiptir ve bu husus radyo ve mobil yayıncılık gibi bazı hizmet türleri için çok önemlidir (European Commission, 2010, s. 11).

1.1.3 Radyo Spektrumu

Radyo spektrumu, elektromanyetik spektrumun en düşük frekansa ve en uzun dalga boyuna sahip radyasyonla karakterize edilen kısmıdır. Geleneksel olarak, radyo dalgalarının frekansı 3 kHz ile 300 GHz arasında değişmektedir.

Radyo spektrumu, çok çeşitli ekonomik, sosyal ve bilimsel amaçlar için vazgeçilmez bir kamu kaynağıdır. Mobil, uydu ve sabit kablosuz iletişim, ulaşım, radar sistemleri ve hayatı kolaylaştıran alarmlar, mikrofonlar ve tıbbi cihazlar gibi birçok uygulamada, ayrıca dünyadaki çoğu insan için ana bilgi kaynaklarından biri haline gelen radyo ve televizyon yayıncılığı için kullanılmaktadır (European Parliament-EP, 2012, s. 7). Savunma, kamu güvenliği, afet uyarısı, hava trafik kontrolü, deniz seyrüseferi, hava durumu tahminleri gibi kamu hizmetlerinin sunulması için belirli frekanslar tahsis edilir (Cave, 2002, s. 5).

Elektromanyetik spektrum tükenmeyen, depolanamayan, kıt bir kaynaktır ve farklı bantları farklı özellikler gösterdiğinden homojen değildir (Rosston & Steinberg, 1997, s. 91). Ek olarak, aynı veya bitişik frekanslarda aynı anda ve aynı yerde iletilen sinyaller birbiriyle etkileşime girebileceğinden, tıkanıklığa tabidir (ITU, 2010, s. 45). Elektromanyetik girişim, spektrumun kullanılabilirliğini azaltan veya geçersiz kılan önemli bir sorunu temsil etmektedir (European Commission, 2010, s. 11).

Tamamen teknik bir bakış açısından, radyo spektrumu, herkesin kullanabileceği sınırsız kapasiteye sahip bir kamu kaynağı olarak düşünülebilir. Ancak, farklı radyo sistemleri keyfi olarak aynı spektrum bandını kullanıyorsa, istenmeyen ve zararlı sinyal girişimine neden oluyorsa, radyo dalgaları beklenen hizmeti sağlayamaz. Bu durum, kablosuz hizmetlerin dağıtımının en başından beri, radyo spektrumunun evrensel ortak kullanımına izin vererek zararlı parazitleri önlemek amacıyla spektrum yönetiminin ortaya çıkmasının nedenidir.

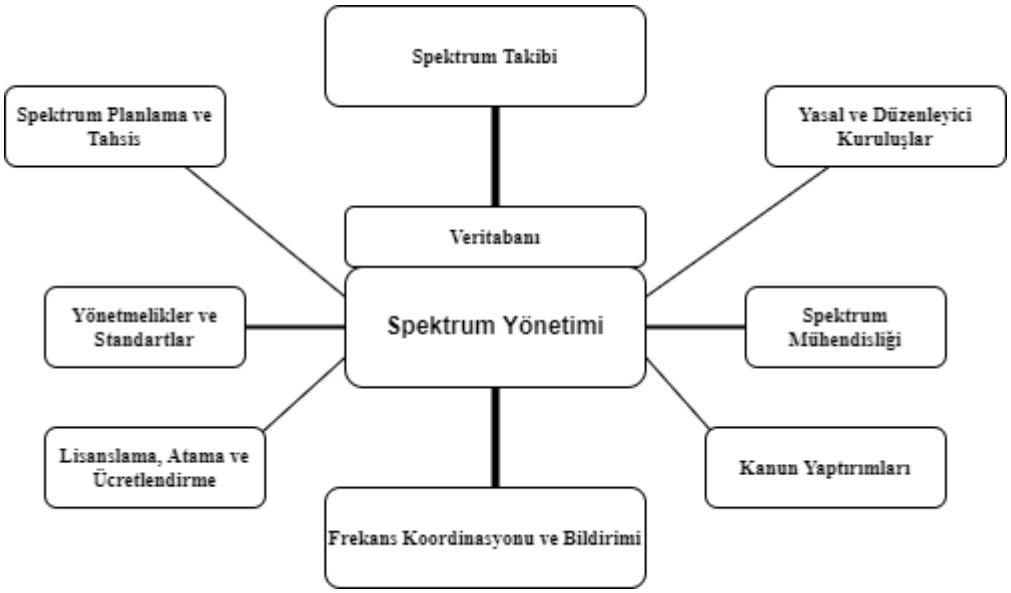
Telsiz iletişiminin etkin kullanımı için ulusal ve uluslararası düzeyde koordinasyon ve düzenlemenin gerekliliği hemen kabul edilmiştir (Chaduc & Pogorel, 2010, s. 74). Ayrıca, bir ülkedeki sistemler için kullanılan radyo dalgaları yayılımları ulusal sınırlarla kısıtlı değildir. Radyo dalgaları sınırları tanımaz, bu nedenle sınırları geçebilir ve istenmeyen parazitlere neden olabilir. Bu durumda, her bir operatör tarafından hizmetlerin etkin bir şekilde sunulmasını engelleyecek kısıtlamalar yaratmadan farklı hizmetlerin spektruma adil erişimini sağlamak için ülke içinde de koordinasyon gereklidir.

1.2 Spektrum Yönetiminin Temel Elementleri

Spektrum yönetimi uygulama anlamında çeşitli unsurlara sahiptir. Bir ulusun bu unsurları ulusal altyapısının bir parçası olarak benimseme derecesi ise spektruma duyduğu ihtiyaca göre değişiklik gösterebilmektedir. Aşağıda yer alan alt başlıklarda spektrum yönetiminde yer alan sekiz farklı unsurdan kısaca bahsedilecektir.

Şekil 1.3

Spektrum Yönetimi Spectrum management in the global village. Luther, 2003, s. 1



1.2.1 Yasal ve Düzenleyici Kuruluşlar

Spektrum yönetiminin önemli bir parçası olarak yasal ve düzenleyici kuruluşlar; radyokomünikasyon kullanımı ve düzenlenmesi için yasalarda temel sağlamakta; kavramlar, yetkiler, geniş hedefler ve sorumluluklar oluşturmaktadır. Bu uygulamalar ise spektrumun herkes için erişilebilir bir kaynak olduğu ve spektrum yönetiminin her zaman kamu yararına olduğu göz önünde bulundurularak yapılmaktadır (Luther, 2003, s. 1).

1.2.2 Spektrum Planlama ve Tahsis

Spektrum planlaması ve tahsisi, radyo frekansı spektrumunun farklı radyo servisleri arasında özel veya ortak olarak dağılımına karar verme sürecidir. Küresel ve bölgesel spektrum tahsislerini düzenleyen uluslararası anlaşma, birkaç yılda bir Dünya Radyokomünikasyon Konferansı'nda (WRC) güncellenen Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) Radyo Düzenlemeleri (RR) olarak bilinir. WRC'de alınan uluslararası frekans kararlarına dayanarak ülkeler, spektrumun belirli sistemler ve lisans sahipleri tarafından kullanılmasına izin veren ulusal bir frekans tahsis tablosu oluşturabilir (Luther, 2003, s. 1).

1.2.3 Spektrum Mühendisliği

Spektrum yönetimi kararlarında her ne kadar sosyal, ekonomik ve politik düşünceler göz önünde bulundurulsa da, verimlilik söz konusu olduğunda teknik faktörler göz ardı edilememektedir. Dolayısıyla alınan kararlar spektrum mühendisliği ışığında teknik ve teknolojik analizlere dayanmaktadır (Luther, 2003, s. 1).

1.2.4 Yönetmelikler ve Standartlar

ITU, uluslararası spektrum tahsisi ve spektrum yönetimi ile ilgili genel kurallar ve düzenlemeler oluşturmuştur. Bu anlaşma hükümlerini dikkate alarak, her üye devlet, ulusal altyapısını yerleştirmek için ilgili kural ve düzenlemelerle kendi mevzuatını oluşturabilmektedir (Luther, 2003, s. 1).

1.2.5 Frekans Koordinasyonu ve Bildirimi

Belirli hizmetlere ve sistemlere frekansların atanabileceği, bu sayede en fazla sayıda kullanıcının barındırılabileceği veya en yüksek kamu yararının sağlanabileceği bir mekanizma oluşturmak gereklidir. Bu durum, dahili olarak veya başka bir ülkenin istasyonuyla çakışabilecek bir atama yapılmadan önce bir frekans koordinasyon süreci aracılığıyla gerçekleştirilebilmektedir. Frekans koordinasyonunun özellikle ulusal sınırların yakınında çok önemli olduğu değerlendirilmektedir (Luther, 2003, s. 2).

1.2.6 Lisanslama, Atama ve Ücretlendirme

Bir telekomünikasyon otoritesi, önerilen bir sistemin geçerli düzenlemelere uygun olduğunu belirlediğinde, frekans tahsisi veya lisanslama yapabilir. İdari hizmet düzeyine ilişkin düzenleyici hükümlere dayalı olarak, bu faaliyetle eş zamanlı şekilde düzenleyici işlem için bir ücret alınabilmektedir (Luther, 2003, s. 2).

1.2.7 Kanun Yaptırımları

Kullanıcıların yetkilendirme koşullarına uymaması halinde spektrum yönetiminden optimal düzeyde fayda sağlanamaz. Ulusların kendi çıkarlarına yönelik oluşturdukları yönetmeliklerde, ihlal tespiti halinde yapılacak icra takibini tanımlayan hükümler yer almaktadır. İhlalin ciddiyetine bağlı olarak, cezalar uyarıdan para cezasına, lisansın iptaline, ekipmana el konulmasına ve hatta hapse atmaya kadar değişebilmektedir (Luther, 2003, s. 2).

1.2.8 Spektrum Takibi

Spektrum takibi, spektrum yönetim sürecinin gözü ve kulağı olarak hizmet etmektedir. Pratikte gereklidir, çünkü gerçek dünyada spektrumun izinli kullanımı, amaçlandığı gibi kullanılmasını garanti edememektedir. Bu, ekipmanın karmaşıklığından, diğer ekipmanlarla etkileşiminden, ekipmanın arızalanmasından veya kasıtlı yanlış kullanımdan kaynaklanabilir. Etkili bir spektrum yönetim süreci için spektrum izleme faaliyeti sürekli olmalıdır (Luther, 2003, s. 2).

1.3 Spektrum Yönetiminde Uluslararası İlişkiler

Bilindiği üzere spektrum, frekansı 9 kHz ile 3000 GHz arasında olan ve hatta 3000 GHz'in üzerindeki frekanslarda dahil olmak üzere elektronik haberleşme amacıyla kullanılan dalgaların frekans aralığını ifade etmekte olup, kullanılarak tüketilemeyen doğal kıt bir kaynak olarak tanımlanabilmektedir (Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, 2017). Spektrum kullanan servislerin bir arada parazitsiz bir şekilde sürdürülmesini garanti etmek amacıyla; spektrum yönetimi uygulamaları uluslararası, bölgesel ve ulusal olmak üzere üç katmanlı bir coğrafi yapıdan oluşmaktadır. Spektrum yönetimindeki bu üç katmanlı coğrafi yapı, tahsislerin gerekli uluslararası uyumunu sağlamak ve aynı zamanda, spesifik kullanımlara nihai spektrum tahsisinden ve bireysel kullanıcılara tahsisten sorumlu olan Spektrum Yönetimi Otoriteleri'ne (SMA) belirli bir derecede esneklik sağlamak amacıyla düzenlenmiştir (Melody & Lemstra, 2011, s. 135).

ITU, radyo spektrumu kullanımını uluslararası düzeyde koordine etme, paraziti yönetme ve küresel standartları belirleme görevini üstlenmektedir. Ayrıca ITU spektrum tahsisi için temel çerçeveyi sağlamakta, spektrum bölümlerini çeşitli radyokomünikasyon hizmetleri kategorilerine dağıtmaktadır (Lie, 2004, s. 6). 1865 yılında kurulan ITU, modern iletişim teknolojilerinin faydalarını dünya çapında yaygınlaştırma amacını izleyen Birleşmiş Milletler Bilgi ve İletişim Teknolojileri (ICT) uzman kuruluşudur (ITU, t.y.). ITU, kendi idareleri ve endüstrileri tarafından temsil edilen ulusal hükümetlerin, telekomünikasyon ağlarını başarıyla işletebilecekleri ve hizmet sunabilecekleri kuralları belirlemek için birlikte çalışabilecekleri bir çerçeve sağlayan tarafsız bir uluslararası örgüt olarak hareket etmek üzere oluşturulmuştur (Beutler, 2012, s. 22).

Merkezi Cenevre'de yer alan ITU, yapısal olarak; Radyokomünikasyon (ITU-R), Telekomünikasyon Standardizasyonu (ITU-T) ve Telekomünikasyon Geliştirme (ITU-D) olmak üzere üç sektöre ayrılmıştır. Üç ITU sektörünün her biri, üyelerin küresel telekomünikasyon hizmetlerinin işleyişi için temel teşkil eden anlaşmaları müzakere ettiği konferanslar ve toplantılar aracılığıyla çalışmaktadır (Beutler, 2012, s. 22).

ITU-R, elektromanyetik spektrumda yer alan frekans bantlarının genel kullanım türlerine göre tahsis edilmesinden sorumlu sektördür. ITU-R; yer, sabit, uydu ve uydu yörüngelerini kullananlar da dahil olmak üzere tüm radyokomünikasyon hizmetleri tarafından kullanılan radyo frekansı spektrumunun rasyonel, adil, verimli ve ekonomik kullanımını sağlamaktadır. Ayrıca ITU-R'ın frekans tahsisi konusunda ülkeler arasında

koordinasyon ve anlaşmayı kolaylaştırmak, radyokomünikasyon konularında çalışmalar yapmak ve tavsiyeleri onaylamak gibi sorumlulukları da vardır (ITU, t.y.).

Bu görevi yerine getirirken, ITU-R, radyo frekansı spektrumunun ve uydu yörüngelerinin kullanımını düzenleyen uluslararası anlaşmayı oluşturan ve tüm ITU Üyeleri üzerinde bağlayıcı etkisi olan RR'ı ilan eder. Esasen RR, frekans bantlarının radyokomünikasyon hizmetlerine nasıl tahsis edilmesi gerektiğini ve zararlı enterferansı önlemek için SMA'ların izlemesi gereken prosedürleri belirleyen uluslararası çerçevenin özünü oluşturur (ITU, t.y.). RR gözden geçirilerek yeni teknolojik, ekonomik ve politik gelişmelere ayak uydurmak için ITU'nun Dünya Radyokomünikasyon Konferansları (WRC) aracılığıyla her üç ila dört yılda bir revize edilir (ITU, t.y.).

Tablo 1.1

Radyo Spektrumunda Yer Alan Frekans Alt Bantları

Frekans Alt Bandı	Kısaltma	ITU Numarası	Frekans
Aşırı düşük frekans	ELF	1	3 Hz-10 Hz
Süper düşük frekans	SLF	2	30 Hz-300 Hz
Ultra düşük frekans	*ULF*	3	300 Hz-3000 Hz
Çok düşük frekans	*VLF*	4	3 kHz-30 kHz
Düşük frekans	*LF*	5	30 kHz-300 kHz
Orta frekans	*MF*	6	300 kHz-3000 kHz
Yüksek frekans	*HF*	7	3 MHz-30 MHz
Çok yüksek frekans	*VHF*	8	30 MHz-300 MHz
Ultra yüksek frekans	*UHF*	9	300 MHz-3000 MHz
Süper yüksek frekans	*SHF*	10	3 GHz-30 GHz
Aşırı yüksek frekans	*EHF*	11	30 GHz-300 GHz
Terahertz radyasyonu	*THF*	12	300 GHz-3000 GHz

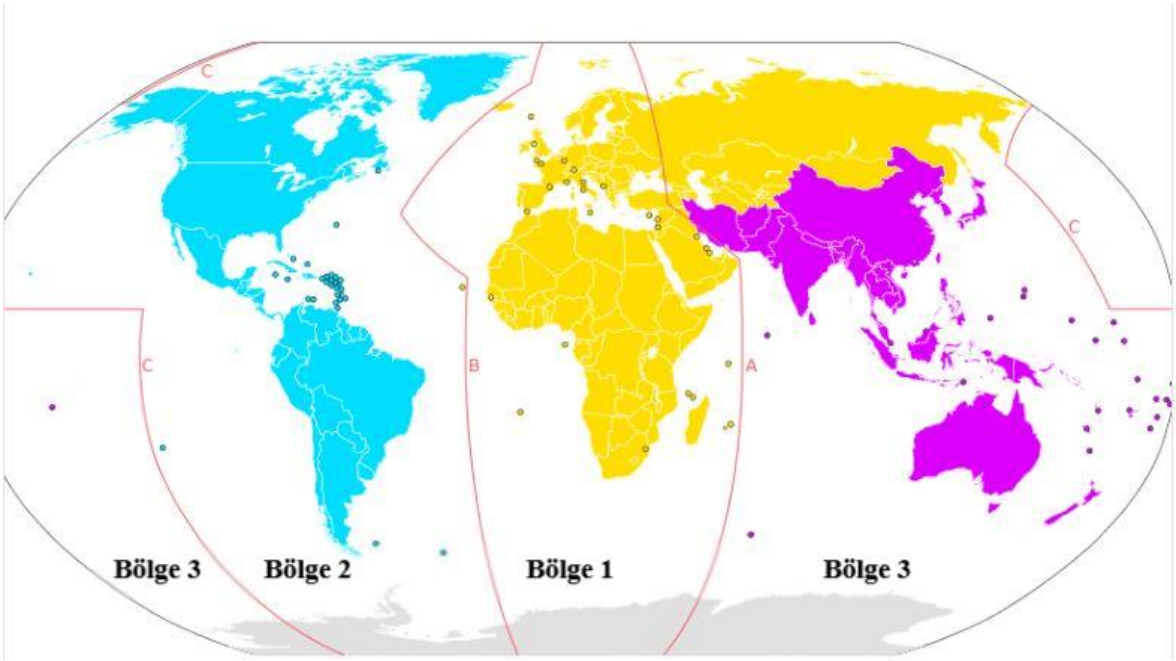
Journal of Composite Material. Ku, 2003, s. 14

Spektrum tahsisi konusunda, ITU: frekans, coğrafi konum ve kullanıcının girişim açısından önceliği olmak üzere üç temel parametre kullanmaktadır. Frekansla ilgili olarak, ITU radyo spektrumunu Tablo 1.1'de gösterildiği gibi çeşitli alt bantlara ayırmıştır.

Kullanılan frekans aralığı 3 kHz'den 3000 GHz'e kadardır. Frekans birimi hertz'dir (Hz); fakat pratiklik açısından, kilohertz (1 kHz = 10^3 Hz); megahertz (1 MHz = 10^6 Hz); gigahertz (1 Ghz = 10^9 Hz) birimleri de kullanılmıştır ("Frekans Nedir?," t.y.).

Şekil 1.4

ITU Bölgeleri ITU Regions and Map. TA1LSX, 2019



ITU, spektrum planlaması yaparken coğrafi boyuta göre, dünyayı üç bölgeye ayırmıştır: Avrupa, Afrika, Orta Doğu ve Asya'nın kuzey kısmı 1. Bölge'ye dahil edilmiştir. Amerika ve bazı doğu pasifik adaları Bölge 2'yi oluşturmaktadır. Asya ve Okyanusya'nın güney kısmı ise Bölge 3'te yer almaktadır. Şekil 1.4'te görüldüğü gibi Türkiye Bölge 1'de yer almaktadır.

Spektrum kullanımı açısından dünyanın farklı bölgelerinin farklı gereksinimleri vardır. Bu nedenle, ortak görüşlerini ITU düzeyinde geliştirmek ve uygulamak için ülke gruplarını temsil eden birkaç bölgesel örgüt oluşturulmuştur. Bölgesel organizasyonların WRC'lerde konferanslar öncesinde hem de sırasında müzakereleri kolaylaştırmak gibi rolleri bulunmaktadır (Beutler, 2016, s. 37). Bölgesel organizasyonlar; uluslararası ve ulusal düzey arasında, spektrum yönetimi politikasının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Lie, 2004, s. 6).

Avrupa Posta ve Telekomünikasyon İdareleri Birliği (CEPT) posta ve telekomünikasyon konularıyla ilgilenen bir Avrupa bölgesel kuruluşudur ve şu anda 46 ülkeden üyesi bulunmaktadır. CEPT; 1959 yılında kurulmuş olup temel amacı, üyeler arasındaki ilişkileri derinleştirmek, işbirliğini geliştirmek ve Avrupa postaları ve elektronik iletişim alanında dinamik bir pazar yaratılmasına katkıda bulunmaktır (CEPT, 2022). CEPT gibi bölgesel organizasyonlar, yetkinlik alanı dahilindeki ulusal tahsis süreçlerinde ve koordinasyonda önemli bir uyum düzeyine ulaşmayı amaçlamaktadır. Böylece spektrumun daha verimli kullanılması sağlanabilir.

Sivil havacılık, araştırma ve radyo astronomi gibi belirli sektörlerde diğer uzmanlaşmış uluslararası kuruluşlar bulunmaktadır (Guidance on the Regulatory Framework for National Spectrum Management, 2018, s. 3). Bununla birlikte, radyo spektrum yönetimi esas olarak ulusal bir sorumluluk olmaya devam etmektedir. Ulusal düzeyde her ülke, spektrum politikasıyla ilgili ulusal kararları uygulayacak ve bu kararların bölgesel ve uluslararası düzeyde alınan kararlarla uyumluluğunu sağlayacak bir veya daha fazla düzenleyici otoriteye (SMA) sahiptir. Genellikle telekomünikasyon, yayın ve savunma olmak üzere farklı türde spektrum kullanımından sorumlu farklı ulusal makamlar bulunmaktadır. Ayrıca çoğu ülkede spektrum ve içerik farklı otoriteler tarafından düzenlenmektedir (Beutler, 2016, s. 41-42).

Uluslararası olarak tanımlanan tahsis çerçevesi içinde, SMA 'lar spektrumun belirli kullanımlara tahsis sürecinden, ulusal bir frekans tahsisi tablosunun tanımlanmasından ve frekansların kullanıcılara tahsis sürecinden sorumludur. Uluslararası düzeyde her bir frekans bandında birkaç hizmet tahsis edildiğinden, SMA'lar ulusal ihtiyaçları dikkate alarak ne tür bir hizmetin dağıtılacağına yüksek derecede esneklikle karar verebilmektedir (Handbook: National spectrum management, 2005, s. 1-35). Örneğin karasal yayıncılıkta, düzenleyiciler ağ operatörlerine televizyon veya radyo programları gibi bir yayın hizmeti sunmak için belirli bir frekans aralığını kullanma hakkını veren lisanslar vermektedir. Tipik olarak, lisanslar 5 ila 15 yıl arasında değişen sınırlı bir süreye sahiptir ve ağ işletimi için komşu ülkelerle olan koordinasyon faaliyetlerinin sonucu olarak ortaya çıkan teknik koşullara tabidir (Beutler, 2016, s. 41-42).

Ulusal düzenleyici otoriteler, ITU faaliyetlerine aktif olarak katılmaktadır. Özellikle, ITU düzeyinde, yalnızca ulusal idarelerin kendi ulusal düzenleyici kurumları aracılığıyla hareket etmelerinin kabul edildiği gruplar ve toplantılar vardır. Bunlar; Tam Yetkili Konferans veya WRC'dir. Ulusal düzenleyici otoritelere örnek olarak Amerika

Birleşik Devletleri'nde (ABD) Federal İletişim Kurulu (FCC), Birleşik Krallık'ta ise OFCOM gösterilebilir (Beutler, 2016, s. 41-42).

Ülkemizde 5809 sayılı Elektronik Haberleşme Kanunu ile "Milli Frekans Planı" hazırlama yetkisi, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumuna (BTK) verilmiştir. Milli Frekans Planı, elektronik haberleşme amacıyla kullanılan 9 kHz-3000 GHz frekans aralığını kapsamaktadır. Milli Frekans Planında frekans tahsislerindeki kanal planlanlaması ITU, Uluslararası Denizcilik Kurumu (IMO), Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO), Avrupa Birliği (AB) ve CEPT gibi uluslarası organizasyonların kararları çerçevesinde yapılır. Planda, Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK) tarafından kullanılacak frekans bandları ve Radyo ve Televizyon Üst Kuruluna (RTÜK) yayın amacıyla kullandırılacak frekans bandları ayrıca belirtilmektedir (Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, t.y.).

1.4 Ülkemizde Karasal Yayıncılık Spektrumunun Yönetimi

Tezin bu bölümünde Tablo 1.2'de yer alan yayıncılık frekans bantlarından yapılan karasal yayıncılık ve karasal yayıncılığın uygulanmasına imkan veren modülasyon teknikleri incelenmiştir. Devamındaki başlıklar altında ise, karasal yayıncılık bandına olan talep ve buna bağlı olarak bandın verimli şekilde yönetilmesine yönelik olan ihtiyaca vurgu yapılmıştır.

Tablo 1.2

ITU Bölge 1 Yayıncılık Frekans Bandları

Frekans Bandı	Frekans (MHz)	Uygulama
Band I (VHF)	47-68	Analog TV, (Kablo TV)
Band II (VHF)	87-108	FM Radyo
Band III (VHF)	174-230	Analog TV, Sayısal TV
Band V,IV (UHF)	470-862	Analog TV, Sayısal TV
L-Band	1452-1492	T-DAB

Düzenleyici Kurumların Sayısal Yayıncılıkta Rolü. Paçacı vd., 2011

1.4.1 Karasal Yayıncılık

Radyo ve televizyon yayıncılığında, yayını izleyiciye ulaştırmak amacıyla karasal, uydu ve kablo olmak üzere üç ortam kullanılmaktadır. Karasal ortam 6112 sayılı Radyo ve

Televizyonların Kuruluş ve Yayın Hizmetleri Hakkında Kanunun "Tanımlar" başlıklı üçüncü maddesinde "yayın hizmetinin karasal verici sistemleri vasıtasıyla alıcılara iletildiği ortam" olarak tanımlanmakta olup, yayıncılığın başlangıcından itibaren kullanılması sebebiyle en bilinen yayıncılık yöntemi olduğu söylenebilir.

Karasal ortamda radyo ve televizyon yayınları antenler vasıtasıyla iletilmekte veya alınmaktadır. Antenler basitçe, vericiye (transmitter) veya alıcıya (receiver) elektriksel olarak bağlı iletkenler olarak tanımlanabilmektedir (Graf, 1999, s. 29). Tasarımlarına bağlı olarak antenler, radyo dalgalarını yatayda tüm yönlerde eşit oranda (çok yönlü antenler) veya belirli yönlerde kazançlı olarak iletebilmekte ve alabilmektedirler (Bevelacqua, t.y.).

İletimin sağlanabilmesi için anten terminallerine bir radyo vericisi tarafından elektrik akımı sağlanır ve anten gelen bu enerjiyi elektromanyetik dalgalar (radyo dalgaları) olarak yayar. Bu elektromanyetik alan, ışık hızında bir dalga olarak antenden uzağa yayılır. Sinyal yayıldıkça zayıflamakta ve arazi, atmosfer ve diğer faktörler yayılmayı etkileyebilmektedir. Sinyalin alımı sırasında ise elektromanyetik dalga alıcının anteninden geçer ve bir akım indükler. Buradaki kritik nokta alıcı antenden, alandaki tüm elektromanyetik radyasyonun geçiyor olmasıdır. Alıcının doğru sinyali algılaması için, istenen sinyali diğerlerinden izole edebilmesi gerekmektedir. Alıcı, almaya çalıştığı aynı frekans bandını kullanan iki vericinin kapsama alanındaysa, demodülasyon için istenen sinyali düzgün şekilde yakalayamayabilir ve yakaladığı şey anlaşılmayabilir. Spektrum yönetimi süreci bu durumun oluşmasını engellemeye çalışır. Amaç, vericilerin aynı frekansları kullanmasını engellemek değil, alıcıların istenen sinyalleri alabilmesini ve ayırt edebilmesini sağlamaktır. Alıcılar istenen sinyali diğerlerinden ayırt edebildikleri sürece, aynı taşıyıcı frekansını kullanan birden fazla verici olabilmektedir (Stine & Portigal, 2004, s. 12).

Yayıncılığın temel amacı ses, görüntü ya da bir bilginin anten vasıtasıyla elektromanyetik dalgalara dönüştürülerek çevreye yayımlanmasıdır. Modülasyon ise alçak frekanslı bir bilgi sinyalinin, yüksek frekanslı bir taşıyıcı sinyal ile birleştirilerek uzak mesafelere taşınmasını sağlayan, yayıncılıkta kullanılan bir yöntem olarak tanımlanabilmektedir. Modülasyon teknikleri analog ve sayısal olarak ikiye ayrılmakta olup, bu teknikler karasal, uydu ve kablo ortamlarında kullanılabilmektedir (Carritech Telecommunications, 2018).

1.4.1.1 Analog Yayıncılık

Analog yayın 6112 sayılı Kanunun "Tanımlar" başlıklı 3 üncü maddesinde, "analog modülasyon tekniği kullanılarak kablo, uydu, karasal ve benzeri ortamlardan yapılan yayın hizmetleri" şeklinde tanımlanmaktadır. Teknik olarak analog sinyaller zamana göre değişkenlik ve süreklilik gösteren sinyaller olarak tanımlanabilmekte olup analog yayın ise video ve ses iletmek için analog sinyalleri kullanan yayıncılık teknolojisidir ("Analog vs. digital signals: Uses, advantages and disadvantages," t.y.).

Radyo ve televizyon yayıncılığı karasal ortamdan iletilen yayınların türüne göre iki ayrı grubu ifade etmektedir. Karasal ortamdan iletilen ses sinyalleri için frekans modülasyonu tekniği kullanılırken, video sinyalleri için ise genlik modülasyonu tekniği kullanılmaktadır. Bu durumda; karasal ortamdan iletilen radyo yayınları için frekans modülasyonu, karasal ortamdan iletilen televizyon yayınları için hem genlik hem frekans modülasyonu kullanılmaktadır.

1900'lü yılların başından itibaren hayatımıza giren televizyon yayınları neredeyse bir asır boyunca hep analog teknoloji kullanılarak yapılmıştır. Bu teknolojinin temelinde belirli bir frekans aralığında sınırsız sayıda değeri barındıran video ve ses verisinin elektromanyetik dalgalar ile iletilmesi yatmaktadır. Örneğin analog video yayını, değişken voltajlı elektromanyetik bir dalganın geniş bir frekans diliminden iletilmesi olarak açıklanabilir. Sinyalin gönderildiği televizyon görüntünün renklerini elektromanyetik dalganın değişken voltaj seviyelerine göre ortaya çıkarmaktadır. Siyah-beyaz bir video sinyalinde 0 Volt tam siyah, 0.7 Volt ise beyaz olmak üzere, sinyaller bu voltaj seviyeleri arasında gönderilmektedir (Gedik, t.y., s. 11).

Analog yayıncılıkta spektrumun verimli kullanımı anlamında, görüntü ve sesin dalgalar halinde iletilirken büyük bant genişlikleri kullanıyor olması, bu teknolojinin olumsuz bir yanı olarak değerlendirilmektedir (Gedik, t.y., s. 11). Analog televizyon yayıncılığında VHF (174-230 MHz) frekans aralıklarında 7 MHz'lik; UHF (470-790 MHz) frekans aralıklarında ise 8 MHz'lik kanal genişlikleri kullanılmaktadır. Ayrıca, Band I olarak adlandırılan 47-69 MHz frekans aralığı da analog yayıncılık için kullanılmaktadır.

Bir televizyon yayınının analog olarak iletilmesi için öncelikle görüntü pixel denilen elektriksel parçacıklara bölünmekte, sonrasında görüntüyü oluşturan her kare tek bir hattan ard arda gönderilmektedir. Bu yöntem tarama (scanning) olarak tanımlanmaktadır. Dünya üzerinde 50 Hz kare hızına sahip sistemler ve 60 Hz kare hızına sahip 525 satırlı sistemler olmak üzere iki analog televizyon standardı bulunmaktadır. Renkli televizyonun icadı birçok

ülkenin kendine has analog televizyon standardı oluşturmasına sebep olmuştur. Bu sayede yayıncılar kendi sinyallerini NTSC (National Television System Committee), PAL (Phase Alternating Line) veya SECAM (Séquentiel Couleur a Mémoire) analog kodlama sistemine göre şifreleyip bunu bir UHF veya VHF taşıyıcı üzerine bindirerek iletimini gerçekleştirirler (Morgül, 2011, s. 44-45).

1.4.1.2 Sayısal Yayıncılık

Fiziksel değişkenlerin durumu hakkında bilgi taşıyan ve matematiksel fonksiyon olarak gösterilebilen kavrama sinyal denilmektedir (Priemer, 1991, s. 1). Mühendislikte ise sinyal kavramı; bağımsız değişkeni genellikle zaman olmak üzere bağımsız değişkenin tüm değerleri için fonksiyonun aldığı değerler olarak tanımlanabilmektedir.

1.4.1.1 Analog Sinyaller başlığı altında, analog sinyaller zamana göre değişkenlik ve süreklilik gösteren sinyaller olarak tanımlanmıştır. Sayısal sinyaller ise teknik olarak verileri belirli bir zaman aralığında sınırlı sayıda olası değer ile ayrık olarak temsil eden sinyaller olarak tanımlanabilir ("Analog vs. digital signals: Uses, advantages and disadvantages," t.y.). Sayısal sinyallerde veriler; 0 ve 1 rakamları kullanılarak temsil edilir. Analog sinyaller sürekli, sayısal sinyaller ise sürekli olmayan sinyallerdir.

Sayısal yayının 6112 sayılı Kanunun "Tanımlar" başlıklı üçüncü maddesinde "Sayısal kodlama ve modülasyon tekniği kullanılarak kablo, uydu, karasal ve benzeri ortamlardan yapılan yayın hizmetini," ifade ettiği görülmektedir. Basitçe sayısal yayıncılık radyo frekans bantları üzerinden yayın yapmak amacıyla analog sinyaller yerine sayısal sinyaller kullanmak olarak tanımlanabilmektedir.

İletişim sistemlerinde analog sinyalleri kullanmanın bazı belirgin dezavantajları, sektörü sayısal yayıncılık sistemlerine doğru yöneltmiştir. Örneğin; analog yayınlar coğrafi faktörler ve ortamdaki olumsuzluklar sebebiyle özellikle uzak mesafelere veri iletiminde istenmeyen sinyal bozukluklarına ve enterferansa neden olabilmektedir. Ayrıca analog sinyaller dijital sinyaller ile karşılaştırıldığında gürültüye ve bozulmaya daha elverişlidir (Shiomi & Hatori, 2000, s. 6-7-8-9).

Analog görüntü ve sesler, manyetik ortamlardan ciddi şekilde etkilenirken, sayısal görüntü, ses ve videolar manyetik etkilerden neredeyse hiç etkilenmemektedir. Sayısal teknolojilerin kullanılmaya başlamasıyla birlikte sayısal yayınların iletiminde analog yayınlara oranlara daha az kapasite kullanımının gerçekleştirilmesinin yanı sıra, daha az güç

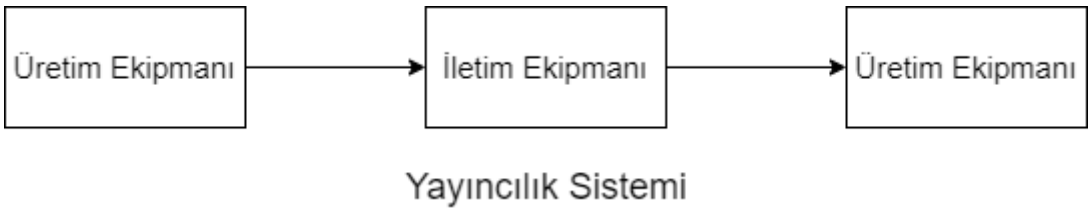
kullanımı ile daha geniş alanların kapsaması sağlandığından, elektromanyetik kirlilikten korunmaya da yardımcı olmaktadır (Gevri, 2019, s. 89).

1980'li yıllarda analog yayıncılığa dair bahsi geçen dezavantajlar, analog yayıncılık altyapısının giderek artan ihtiyaca yanıt veremeyeceği kanısını ortaya çıkarmıştır. Artan talep ile yayıncılık kalitesinden artan beklenti paralel ilerlemiş ve bu durum Avrupa ve dünyanın çeşitli ülkelerinde sayısal yayıncılıkla ilgili çalışmaların başlamasını tetiklemiştir (Gedik, t.y.).

Yayın sistemleri temel olarak; üretim ekipmanı, iletim ekipmanı ve alıcı ekipmanı olmak üzere üç ana unsurdan oluşmaktadır. Şekil 1.5'te yer alan bu temel yapı hem analog hem de sayısal yayın sistemleri için geçerlidir.

Şekil 1.5

Yayıncılık Sistemi Şeması Digital Broadcasting. Shiomi & Hatori, 2000, s. 7



Ancak sayısal bir sistemde resim ve beraberindeki sesin içerdiği analog bilgiler öncelikle dijitale dönüştürülür. Daha sonra sinyalin belirli kısımlarını dijital olarak sıkıştırmak için yüksek verimli kodlama prosedürleri kullanılır ve sıkıştırılmış verilerin birkaç bölgesini birleştirmek için çoğullama (multiplexing) yapılır. Devamında iletim sırasında meydana gelen hataları düzeltmek için ileriye dönük hata düzeltme kodları eklenir ve sinyalin iletildiği frekans spektrumunu verimli bir şekilde kullanmak için sinyal dijital olarak modüle edilir ("Analog vs. digital signals: Uses, advantages and disadvantages," t.y.).

Alıcı tarafında ise orjinal video ve ses sinyallerini geri yüklemek için dijital demodülasyon, hata düzeltme, çoğullama çözme (demultiplexing) ve kod çözme işlemlerinden geçen sinyal ile bu işlem tersine çevrilir. Kodlama ve çoğullama prosedürleri karasal, uydu ve kablo tv olmak üzere tüm iletim modları için aynıdır ("Analog vs. digital signals: Uses, advantages and disadvantages," t.y.).

1990'lı yıllarda **Spectre** adı altında yapılan çalışmalar ile sayısallaştırılmış görüntülerin iletimi için gerekli bant genişliğinin bazı sıkıştırma yöntemleri kullanılarak

oldukça düşürülebileceği gösterilmiştir (Gedik, t.y. s. 27). Karasal sayısal televizyon yayıncılığına ilişkin ise ilk çalışmalar 1993 yılında, DVB (Digital Video Broadcasting – Sayısal Televizyon Yayıncılığı) çatısı altında başlamış olup, bugün itibariyle bu organizasyona 30'dan fazla ülke ve 270'den fazla sektörden katılımcı katkıda bulunmaktadır. DVB organizasyonunun geliştirmiş olduğu standartlar açık olup, Avrupa Telekomünikasyon Standartlar Komitesi (European Telecommunications Standard Institute-ETSI), Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (Comité Européen de Normalisation Électrotechnique-CENELEC) ve Avrupa Yayın Birliği (European Broadcasting Union-EBU) gibi pek çok organizasyon tarafından da kabul edilmektedir (Yiğit, 2012, s. 1).

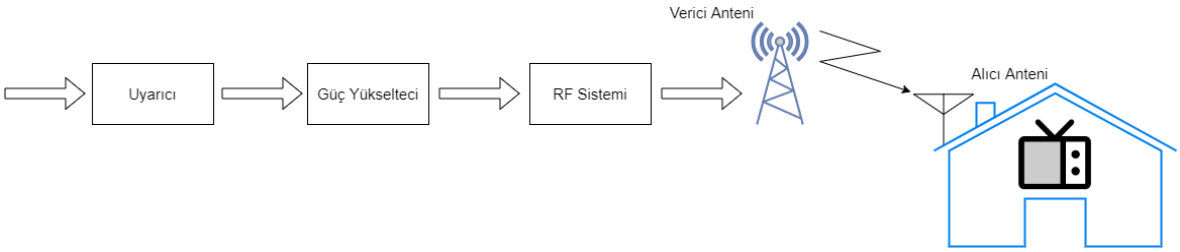
1.4.2 Karasal Yayıncılıkta Spektrumun Değeri

Radyo ve televizyon yayıncılığının temelleri karasal iletim yöntemlerine dayanmaktadır. Radyo yayıncılığı sesin elektrik sinyali haline getirilip, antenler yardımıyla izleyiciye taşınması ardından izleyici tarafında sinyalin yeniden ses haline getirilmesi olarak özetlenebilir. Benzer şekilde televizyon yayıncılığı görüntünün ve sesin elektrik sinyali haline getirilip, antenler yardımıyla izleyiciye taşınmasından sonra izleyici tarafında sinyalin yeniden görüntü ve ses haline getirilmesi olarak özetlenebilir (Kuzu, t.y.).

Karasal yayın iletim sistemleri basitçe, belli yerlere kurulmuş az sayıdaki güçlü vericiler ve yönlendirilmiş antenler içermektedir. Alıcı ve verici sistemler arasında havadan iletim yolu (over-the-air path) kullanılmakta olup yayınlar elektromanyetik dalga olarak iletilmektedirler. Yayının iletilebilmesi için alıcı antenlerin verici antenlerine yönlendirilmesi gerekmektedir (Kuzu, t.y.). Şekil 1.6'da tipik bir karasal yayın iletimini gösteren blok şema yer almaktadır.

Şekil 1.6

Karasal Yayın İletim Blok Şeması Spektrum Yönetimi: Ulusal Güvenlik Bağlamında Ülkemizdeki Karasal Yayıncılık Spektrumunun Yönetimi. Gevri, 2019, s. 141



Sistemin ana bileşenleri şekil 1.6'da görüldüğü üzere bir uyarıcı, güç yükselteci, RF sistem bileşenlerini içeren bir verici, ilgili iletim hattında kullanılan bir verici anteni, birçok alış noktasında sinyallerin alınmasını sağlayan alıcı anteni ve alıcı sistemleridir. Karasal ortamda iletim için yayıncılık sistemlerine giren sinyal, bir RF taşıyıcı yardımıyla modüle edilmiş temel bant sinyalidir. Bir analog sistemde temel bant sinyali, birleşik video ve ses sinyallerini içermektedir. Görsel ve ses sinyalleri ayrı ise görsel ve işitsel taşıyıcılar ile ayrı ayrı modüle edilerek güç yükseltecine girerler. Ortak bir güç yükselteci kullanılacaksa, modüle edilmiş sinyaller uyarıcıda birleştirilir ve güç yükseltecinde birlikte yükseltilir. Birleştirilen sinyaller daha sonra bağlantının geri kalanı boyunca birlikte iletilir (Collins, 2000, s. 1).

Günlük hayatın her alanına yayılan dijital teknolojiler, insanların medyayı tüketme biçimleri üzerinde de etkili olmuştur. Ayrıca yeni teknoloji, her türlü medya içeriğine tek bir teknik platform üzerinden erişime izin vermekle beraber sınırlı sayıda mevcut radyo ve televizyon yayınına karşılık sınırsız seçenekler sunmaktadır. Bu arada radyo ve televizyon programlarının tüm üretim zinciri dijital teknolojiye geçmiştir. Dijital kameralar, dijital video işleme yöntemleri ve dijital arşiv sistemleri bunlara örnek olabilir. Öte yandan, programların dinleyicilere ve izleyicilere ulaştırılması hala sayısal iletim teknolojisine tam olarak taşınmamıştır (Beutler, 2012, s. 1-2).

Yirminci yüzyılın sonunda, karasal yayıncılık diğer iletim yolları üzerindeki üstünlüğünü kaybetmeye başlamıştır. Yayıncılıkta kablo ve uydu ortamı karasal ortamın önüne geçmiştir. Ayrıca, internet üzerinden ses ve video içeriği tüketimi hız kazanmıştır. Hem radyo hem de televizyon hizmetlerinin analog karasal yayıncılığı iki temel sorun nedeniyle baskı altına girdiği değerlendirilmektedir. İlk olarak, CD'ler gibi sayısal medya hizmetlerinin ortaya çıkmasıyla müşteriler yüksek ses ve görüntü kalitesine alışmış ancak

bu kalite karasal dağıtım sistemlerinde her daim mümkün olamamıştır. RTÜK Başkanı Sayın Ebubekir ŞAHİN son yapılan bir kamuoyu araştırmasından *"...Türkiye'de dijital yayın platformlarını kullananlar yüzde 25'lere çıktı. 18-24 yaş aralığındaki gençlerimiz yüzde 43 oranında dijital yayıncılık platformlarını takip etmektedir. Bu yaş grubundaki öğrencilerin dijital yayını izleme oranı ise yüzde 52'dir. Dijital yayın mecralarına bağlanma yüzde 63 oranıyla en çok akıllı telefonlarla sağlanmaktadır. Dijital yayınlar günde en az 2 saat izlenirken yüzde 60 oranıyla en çok dizi filmlerinin takip edildiği görülmektedir…"* verilerini paylaşarak, ülkemizde yayıncılık alanında dijitale dönüşe vurgu yapmıştır ("Ebubekir Şahin," 2021).

Diğer bir önemli sorun ise analog yayınların spektrumda çok yer kaplayıp, az sayıda çeşide sahip olması dolayısıyla spektrum kıtlığını ön plana çıkarmasıdır. Analog yayıncılık için VHF (174-230 MHz aralığı) ve UHF (470-862 MHz aralığı) bantlarında VHF için 7 MHz'lik kanallar, UHF bandı için de 8 MHz'lik kanallar kullanılmaktadır. Bu nedenle, spektrumun daha verimli kullanımları önemli bir konu haline gelmiştir. Tüm bu sorunlar, hem spektrumda yüksek verimlilik hem de yayınlarda daha yüksek kaliteye ulaşılmasına izin veren sayısal yayıncılık sistemlerinin ortaya çıkma nedenleri arasında yer almaktadır (Beutler, 2012, s. 1-2).

Tüm bunlara rağmen günümüzde karasal yayın, ses programlarını dinleyicilere ulaştırmanın en önemli yolu olmaya devam etmektedir. Bunun temel nedeni, radyo dinlemenin insanların araba kullanmak, işte olmak veya boş zamanlarında diğer etkinliklerle uğraşırken yaptıkları bir şey olmasıdır (Beutler, 2012, s. 1-2). FM yayıncılığı 1970'li yıllardan beri ülkemizde gerçekleştirilmektedir. FM Radyo yayıncılığında yüksek frekanstan yayın yapılması nedeniyle (87,5-108 MHz) daha dar kapsamlı alanlara (yerel, bölgesel amaçlı olarak) daha düşük güçlü vericilerle FM modülasyonu kullanılarak yayınları yüksek kalitede ulaştırmak mümkündür. Ancak FM radyo için ayrılan spektrum kısıtlı olup kullanıcı sayısının fazla olduğu görülmektedir (Resmi Gazete, 2006, p. 31-32).

Karasal yayıncılık kamu yayıncılığı açısından önemli bir yer tutmaktadır. Bunun sebepleri arasında karasal yayıncılığın; ücretsiz havadan yayına imkân sağlaması, makul bir maliyet karşılığı neredeyse eksiksiz bir kapsama alanı sağlamaya imkân sunması, açık ve geliştirilebilir standartlar kullanılması sayılabilir (European Broadcasting Union, 2010, s. 7-8-9).

1.4.3 Ülkemizde Karasal Yayıncılık Bandının Yönetimi

Elektronik Haberleşme Kanunun 36'ncı maddesi kapsamında RTÜK'e tahsis edilen yayıncılık spektrumunun yönetimine ilişkin olarak 6112 sayılı Kanun ile televizyon kanal ve radyo frekans planlama yetkisi RTÜK'e verilmiştir.

03/03/2011 tarihinde yürürlüğe giren 6112 sayılı Kanun'un Geçici dördüncü maddesinin beşinci fıkrasında yer alan "Frekans planları ve uygulama takvimi bu Kanunun yayımı tarihinden itibaren bir yıl içinde hazırlanır." hükmü kapsamında RTÜK bünyesinde karasal ortamdan sayısal televizyon yayınları için frekans planlama çalışmalarına başlanmış ve RTÜK ile GATE Elektronik San. Ve Tic. A.Ş. arasında 02/06/2011 tarihinde sözleşme imzalanarak Karasal Radyo ve Televizyon Elektronik Frekans Düzenleme Sistemi (KARTEF) Projesi hayata geçirilmiştir. Proje çalışmaları, Bilkent Üniversitesi bünyesinde faaliyetlerini sürdüren İSYAM ile Fransız ATDI firması ve RTÜK işbirliği ile gerçekleştirilmiştir (Yiğit, 2012, s. 1). Bu proje kapsamında, kapsama alanı, enterferans analizleri ve simülasyonlar yapılmış, frekans tahsisinin tescili ve uluslararası koordinasyon gibi hususlarda çalışmalar yapılmıştır (Radyo ve Televizyon Üst Kurulu, 2012, s. i-ix).

1.5 Sayısal Pay (Digital Dividend) Nedir?

Basitçe sayısal pay spektrumu; karasal televizyon yayınının analogdan sayısala geçişiyle serbest kalan spektrum miktarı olarak tanımlanabilmektedir. Tezin bu bölümünde sayısal pay spektrumunun daha detaylı bir tanımı, potansiyel boyutu ve kullanım alanları incelenmiştir.

Avrupa'da 1996 yılında tanıtılan sayısal televizyon hizmeti, 1950'lerde renkli televizyonun kullanıma girmesinden sonra televizyon teknolojisindeki en önemli gelişme olarak kabul edilmektedir (Commission of the European Communities, 2003). Sayısal televizyon, daha fazla sayıda program içermesi, daha fazla kapsama alanı ve daha iyi bir görüntü ve ses kalitesi sunması gibi özelliklerinin yanı sıra etkileşimli uygulamalar ve yüksek çözünürlüklü televizyon (HDTV) gibi teknolojilere imkan sağlaması gibi özellikleriyle ön plana çıkmıştır (Adda & Ottaviani, 2004, s. 2).

Gelişmiş televizyon teknolojisi ile ek iletim kapasitesi getiren dijital sıkıştırma teknikleri ve daha verimli iletim teknolojileri sayesinde, daha önce tek bir analog kanal tarafından kullanılan aynı radyo frekanslarında, makul kalitede birkaç standart sayısal televizyon kanalı iletilebilir. Tek bir analog kanal tarafından kullanılan aynı radyo

frekanslarında, kodlama ve modülasyon tekniklerine bağlı olarak altı, hatta sekize kadar standart sayısal televizyon kanalı iletilebilir ("Sayısal Tv Yayınları," t.y.). Buradan hareketle sayısal karasal televizyonun, spektrumu, analog karasal televizyondan çok daha verimli kullandığı ve belirli bir spektrum miktarı içinde çok daha fazla içerik taşıdığı çıkarımı yapılabilir.

Şekil 1.7

Sayısala Geçiş Economic Impacts of Alternative Uses of the Digital Dividend. Forge vd., 2008, s. 150



Tek bir analog programı iletmek için kullanılan 6 MHz ila 8 MHz bant genişliğine sahip bir frekans kanalı, dijitalleşme ile eşdeğer kalitede iki ila on iki sayısal programın bir multipleksini taşıyabilir. Ayrıca çoğu sayısal televizyon standardı aynı frekansların çok daha geniş alanlarda yeniden kullanılmasına izin verir (Rancy vd., 2011, s. 13). Sayısal televizyon teknolojisi çok daha iyi bir spektrum tahsisinin büyük potansiyel faydaları ile birlikte spektrumun genel kullanımını önemli ölçüde azaltacaktır (ITU, 2010, s. 27).

Uzun yıllar boyunca, dünya çapında birçok ülkede ve özellikle Avrupa'da 1 GHz'in altındaki radyo spektrumunun büyük bir kısmının, yani VHF (174-230 MHz) ve UHF (470-862 MHz) bantlarının önemli kısımlarının, birincil olarak analog karasal yayına tahsis edildiği görülmektedir (Rancy vd., 2011, s. 13). Analog yayından sayısal yayına geçiş ile başlayıp analog yayınların kapatılmasıyla sona ereceği düşünülen süreç akla iki önemli sonucu getirmektedir.

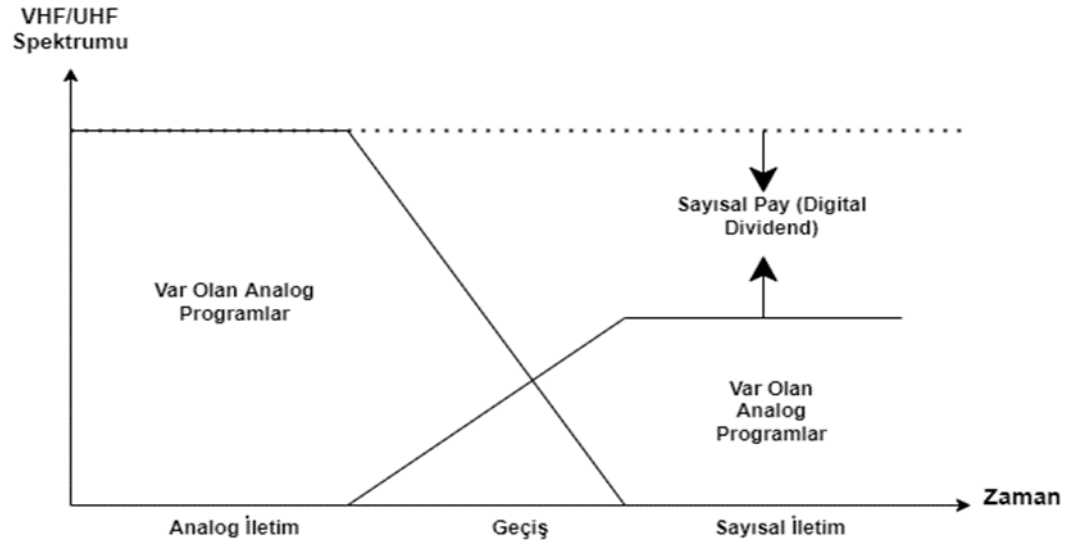
Öncelikle, sayısal teknolojide televizyon kanalları eskisinden daha az spektrum (%25 veya daha az) kullanarak iletilebildiğinden, televizyon hizmetlerinin kalitesinde bir iyileşme ve kapsama alanında bir genişleme olacağı değerlendirilmektedir. Ama aynı zamanda UHF ve VHF bantlarının önemli bir kısmının geleneksel karasal yayın kullanımından kurtulacak olması; özellikle mobil hizmetler için olmak üzere diğer hizmetler için piyasaya sürülmesi; yeni uygulamalara, daha geniş tüketici seçeneklerine ve gelişmiş rekabete yol açabilir (Forge vd., 2008, s. 149).

Karasal televizyon yayınının analogdan sayısala geçişiyle serbest kalan spektrum miktarı, yani VHF ve UHF bantlarındaki mevcut analog televizyon hizmetlerini sayısal biçimde barındırmak için nominal olarak gerekli olanın üzerindeki spektrum miktarı, sayısal pay (digital dividend) olarak tanımlanmaktadır (ITU, 2012, s. 2).

Sayısal televizyon teknolojilerinin ortaya çıkışıyla birlikte, analog televizyon yayıncılığının kapatılması fikirleri ve bunun sonucunda ortaya çıkan sayısal pay, daha verimli bir kullanım yoluyla ICT sektörünün büyümesini arttırmak için büyük bir fırsat oluşturduğundan, karasal yayıncılık spektrumu dünyanın ilgi odağı haline gelmiştir (ITU, 2010, s. i).

Şekil 1.8

Sayısal Pay Spektrumu The Digital Dividend: Opportunities and Challenges. ITU, 2010, s. 28



1.5.1 Sayısal Pay (Digital Dividend) Spektrumunun Boyutu

Her şeyden önce, sayısal pay spektrumunun boyutu, coğrafya ve topografya gibi ulusal özelliklere, kablolu ve/veya uydu televizyon hizmetlerinin kullanım derecesine ve yerel televizyon hizmetleri duyulan gereksinimlere bağlıdır. Ayrıca zararlı enterferansı önlemek veya sınırlama ihtiyacının bir sonucu olarak komşu ülkelerdeki spektrum kullanımından da etkilenebilir. Sayısal pay spektrumu miktarı analog servislerin yerini almak üzere uygulanan sayısal televizyon teknolojisine de bağlıdır. Sayısal pay spektrumunun ekonomik boyutunun ise daha gelişmiş teknolojiler kullanıma sunuldukça artacağı değerlendirilmektedir (ITU, 2010, s. 28).

Aynı zamanda bu spektrum, sayısal televizyon alıcılarının türü, hizmet verilen nüfus yüzdesi, gerekli kalite ve benzerleri de dahil olmak üzere, sayısal yayınların temel parametrelerinin seçimine de bağlıdır. Bu nedenle, sayısal payın boyutu, yayın için spektrum planlama yöntemlerinin çokluğu nedeniyle, ITU'nun farklı bölgelerine göre ve hatta ülkeden ülkeye değişiklik gösterecektir (ITU, 2010, s. 28).

1.5.2 Sayısal Pay Spektrumunun Potansiyel Kullanım Alanları

ITU Bölge 1'de 470-862 MHz'deki UHF bandı tarihsel olarak analog televizyona tahsis edilmiştir. Bununla birlikte, sayısal televizyon teknolojilerinin piyasaya sürülmesi, yayıncıların ihtiyaç duyduğu spektrumu azaltmaktadır. Bu durum UHF frekanslarının bir kısmını mobil hizmetler gibi diğer hizmetlere tahsis etme imkanı verirken, yayıncılara yeni programlar ve diğer ürünler sağlamak için hala olanak tanımaktadır. Bu sebeple WRC-07'de 790-862 MHz aralığında yer alan UHF bandının üst kısmı 2015'ten itibaren olmak üzere, Bölge 1'de mobil servislerin kullanımına açılmıştır (ITU, 2010, s. 30).

Sayısal pay spektrumunun açılabileceği yenilikçi kullanım yelpazesi geniştir ve gelecekte daha da büyüyebileceği düşünülmektedir. ICT sektörünü karakterize eden hızlı değişimler göz önüne alındığında, yeni teknolojiler ve hizmetler ile mevcut teknolojiler için yeni kullanımlar ortaya çıkabilir ve bu da sayısal pay spektrumunun kullanılmasını gerektirebilir (Office of Communications - OFCOM, 2007, s. 30). Yine bu spektrum yayıncılar tarafından sayısal televizyon üzerinden yeni kanallar ya da 3D televizyon gibi yenilikçi ve etkileşimli yayınlar için talep edilebilir. Ayrıca kullanıcıların mobil cihazları kullanarak televizyon almasına ve izlemesine olanak tanıyan mobil televizyon (MTV),

yayıncılar tarafından sayısal pay spektrumu kullanılarak teşvik edilen bir hizmettir. Aynı zamanda ses, veri, video ve multimedya uygulamaları için mobil iletişim servisleri tarafından sağlanan spektrum için üstel talebi de karşılayabilir. Burada ilgili bir husus, sabit lokasyonlara veya mobil terminallere kablosuz geniş bant hizmetlerinin sağlanmasıdır (ITU, 2010, s. 30).

Radyo Spektrumu Politika Grubu (RSPG) tarafından belirtildiği gibi, geniş bant kavramı teknolojik gelişmeler nedeniyle sürekli olarak gelişmekte ve sayısız şekilde tanımlanabilmektedir. RSPG'nin "Kablosuz Geniş Bant için Büyüyen Spektrum Talebinin Ele Alınmasında Avrupa'nın Karşılaştığı Stratejik Zorluklar" hakkındaki görüşünde, geniş bant terimi; web'de gezinme, internet üzerinden ses protokolü (VOIP) ve video hizmetleri dahil olmak üzere medya açısından çok çeşitli zengin hizmetlere erişim olasılığı olarak tanımlanmaktadır (Radio Spectrum Policy Group, t.y., s. 22-23). Geniş bandın işlevsellik anlamında yani bir geniş bant şebekesi tarafından sağlanabilecek hizmetler ve uygulamalar açısından tanımlanması oldukça yaygındır, ancak mümkün olan tek tanım bu değildir. Bu terim, kullanıcılara hizmet sunmak için kullanılan altyapıyı belirtmek için de kullanılır. Teknik olarak ise geniş bant, veri aktarım hızı anlamına gelmektedir. Yani bir ağ bağlantısı üzerinden bir saniyede iletilebilen veri miktarıdır ve aynı zamanda veri aktarım hızı veya aktarım hızı (saniyede bit olarak ölçülür - bps) olarak da bilinir (Kelly & Rossotto, 2012, s. 3-4).

Geniş bant, kullanıcıların internet üzerinden daha gelişmiş içerik, hizmet ve uygulamalara erişmelerini sağlayan ve çevirmeli ağ teknolojilerinin sağladığından daha hızlı olan son internet bağlantılarını tanımlayan, yüksek hızlı bir veri iletimi ile ilgilidir. Ancak bu terim belirli bir hıza ya da belirli bir hizmete atıfta bulunmamaktadır.

Geniş bant hizmetleri hem kablolu hem de kablosuz altyapı üzerinden sunulabilir. Bu iki farklı altyapı sistemi bazen birbirleriyle rekabet ediyor gibi görülsede, bazı durumlarda birbirlerini tamamlayıcıdırlar. Trendler, geniş bant hizmetlerinin bu altyapılar üzerinden ve özellikle kablosuz geniş bant için ciddi bir büyüme vaadettiğini göstermektedir (Radio Spectrum Policy Group, t.y., s. 7).

Kablosuz geniş bant sabit, mobil veya uydu platformları aracılığıyla sağlanabilir. Sabit bir kablosuz hizmet, evler ve ofisler gibi kalıcı konumlardaki cihazlara kablosuz geniş bant sağlar. Bir mobil geniş bant hizmeti (WiMAX, LTE), kafeler ve tren istasyonları gibi geçici yerlerde bulunabilecek kullanıcılara bağlantı sağlar. Uydu ağının özelliklerine bağlı olarak, sinyalin bir uyduya yukarı bağlantılı olduğu ve daha sonra bir uydu çanağına indiği

uydu geniş bant, mobil veya sabit geniş bant kullanıcılarına veya her ikisine birden hizmet verebilir (Radio Spectrum Policy Group, t.y., s. 7).

Sayısal pay spektrumu, halihazırda sayısal yayıncılık için kullanılan frekans aralığı içinde olduğundan ek Sayısal Karasal Televizyon (DTT) için uygundur. Özellikle, ev tipi alıcılar ve antenler hali hazırda bu frekanslardaki sinyalleri almak ve kodunu çözmek için tasarlanmıştır ve bu frekanslara kolayca ayarlanabilir. Standart çözünürlüklü (SD) DTT durumunda hanelerin yeni ekipman alması gerekmeyebilir. Ancak yüksek çözünürlüklü (HD) DTT'nin farklı bir kodlama kullanması beklendiğinden, HDTV sinyallerinin kodunu çözmek için şu anda kullanımda olan kodlama standardından farklı bir standart gerekli olacaktır. Bununla birlikte uydu, kablo ve internet dahil olmak üzere DTV hizmetleri sunmanın bir dizi alternatif yolu vardır (Office of Communications-OFCOM, 2007, s. 4)

Televizyon hizmetlerini dağıtmak için alternatif platformların mevcudiyeti, televizyon yayıncılığı için olan spektrum talebini büyük ölçüde etkiler. Özellikle sabit geniş bant ağların yaygınlaşması ve sundukları sürekli artan aktarım hızları, kablo ağlarının dijitalleşmesi ve uydu televizyonunun gelişmekte olan pazarlarda yaygınlaşması, bu tür ağlarda televizyon yayınını mümkün ve çekici kılmaktadır. Örneğin, over-the-top (OTT) hizmet sağlayıcıları tüketicilere doğrudan internet üzerinden bir televizyon hizmet paketi sunar (ITU, 2012, s. 20). Tüketiciler uydu, kablo ve geniş bant platformlarına odaklanırken, karasal televizyon daha az önemli hale gelmekte ve sonuç olarak karasal televizyon ile ilgili teknolojik gelişmeler daha az faydalı olabileceği değerlendirilmektedir.

Mobil operatörler veri, ses, video ve multimedya uygulamaları için yeni mobil iletişim hizmetlerine yönelik artan talebe yanıt vermek için sayısal pay spektrumuna dair frekansları bir fırsat olarak görmektedir (ITU, 2012, s. 26). Kullanıcı dostu akıllı telefonların ve tabletlerin artan başarısı, özellikle internet içeriğine erişim, arama ve indirme biçimlerindeki web trafiğinin hızlı yayılımı nedeniyle veri trafiğinde ekstra bir artışa yol açmıştır. Bunlara örnek olarak çevrimiçi oyun oynama, çevrimiçi müzik dinleme, görüntülü arama, video ve televizyon izleme (yani YouTube), sosyal ağ (yani Facebook, Twitter, LinkedIn), mesajlaşma (e-postalar, anlık mesajlaşma ve benzerleri) ve içerik yükleme ve paylaşma uygulamaları sayılabilir (Zhang & Årvidsson, 2012, s. 13). Cep telefonları tüm dünyada insan yaşamını kökten değiştirmiştir. Cep telefonlarına erişim arttıkça, tüm toplum tarafından mobil geniş banda erişim elde etmek için mobil sektöre yeni bir spektrum tahsisi istendiği varsayılabilir (Office of Communications-OFCOM, 2007, s. 54).

Sayısal pay spektrumunun mobil endüstri için çekiciliği, esasen daha yüksek frekanslı dalgalarla karşılaştırıldığında, bu spektrumun bulunduğu bantlarda yer alan UHF

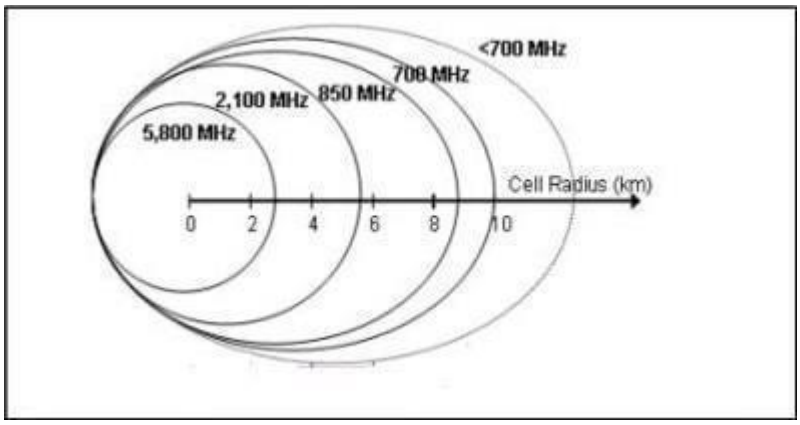
frekansları gibi daha düşük frekanslı dalgaların fiziksel özellikleri ile ilgilidir. UHF frekansları; uzun mesafeli yayılmaya duvarlar, binalar, bitki örtüsü gibi engeller karşısında ihmal edilebilir derecede bozulma ile izin verir (ITU, 2012, s. 6).

Bu nedenle, UHF spektrumu, iç mekanlarda kapsama sağlayabildiğinden dolayı binalarda güvenilir mobil hizmet sağlamak için kullanışlıdır. Aynı zamanda UHF bandı; daha geniş kapsama alanı sağlamak için daha az altyapı gereketireceğinden ve geniş bir hizmet alanını nispeten düşük maliyetle kapsayabileceğinden ötürü mobil geniş bant sağlamak için uygun maliyetli bir araçtır (GSM Association, 2009, s. 4).

Sayısal pay spektrumunun tüm ITU Bölgelerinde uyumlu bir şekilde tahsis edilmesi ile mobil endüstri; özellikle sabit hatların henüz ulaşamadığı bölgelerde, dünyanın her yerindeki insanlara daha ucuz mobil geniş bant hizmetleri ve internet bağlantısı sağlayabilir (GSM Association, 2009, s. 4). Uygun fiyatlı, adil ve büyük çaplı genişbant erişiminin; hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde politika yapıcılar için siyasi bir zorunluluk olduğu değerlendirilmektedir (GSM Association, 2009, s. 3).

Şekil 1.9

Spektrumun Yayılma Karakteristiği Economic Impacts of Alternative Uses of the Digital Dividend. Forge vd., 2008, s. 151



Gelişmiş dünyada mobil geniş bant, genel sosyal refahı arttıran internet teknolojilerinin yayılımı için bir fırsatı temsil etmektedir. Gelişmekte olan pazarlarda, politika yapıcılar, geniş bir internet erişiminin eğitim, sağlık, devlet, bankacılık, sosyal hareketlilik, çevre ve iş alanlarında ICT uygulamalarının güçlendirilmesinde kritik bir rol oynadığını düşünmektedirler. Ayrıca, bu araçların yoksulluk ve az gelişmişlikle mücadele

eden insanların genel yaşam kalitesini önemli ölçüde iyileştirici etkisi olduğu ve cep telefonları sayesinde aradaki dijital uçurumun küçüldüğü çıkarımı yapılmaktadır. Mobil geniş bant, geleneksel geniş bant çözümlerine gerçek bir alternatif sunarak, geniş bant internete erişimi olmayan evlere ve işletmelere hizmetler ve uygulamalar sağlar. Mobil teknoloji, sabit teknolojiden daha kolay, daha hızlı ve daha ucuzdur. Bu husus mobili dijital uçurumu kapatmak ve herkese uygun fiyatlı geniş bant erişimi sağlamak için tek geçerli çözüm haline getirir (GSM Association, 2009, s. 3).

Mobil hizmet, yayınla paylaşılan bir frekans bandı kullanabileceği gibi ayrı, uyumlu bir frekans bandında da çalışabilir. Bu şekilde, uluslararası dolaşım ve dünya pazarları ekipmanının (örneğin Uluslararası Mobil Telekomünikasyon – IMT için) geliştirilmesini destekleyen her yerde bulunan bir hizmetin sağlanması kolaylaştırılacaktır. Ayrıca televizyon kanalları arasındaki beyaz boşluklar kullanılarak genişbant hizmetlerinin sağlanması da mümkün olabilir (ITU, 2010, s. 28).

CEPT Raporu 24'te "beyaz boşluklar (white spaces)" ifadesi, belirli bir coğrafi alanda belirli bir zamanda, herhangi bir müdahale olmaksızın, bir radyokomünikasyon uygulaması için mevcut olan spektrumun bir bölümünü ulusal bazda daha yüksek önceliğe sahip diğer hizmetler için kullanılmasını ifade etmek amacıyla kullanılır (Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), 2008, s. 4). Birkaç kelimeyle, televizyon yayını, zararlı enterferansa neden olmamak için tipik olarak bazı UHF frekanslarını belirli bir zaman ve yerde boşta bırakır. Beyaz boşluklar olarak adlandırılan bu yayın boşlukları diğer servisler için kullanılabilir. Ancak, beyaz boşluk kavramının, spektrumun tek tip olarak kullanılmadığı herhangi bir banda uygulanabileceğini belirtmek faydalıdır (GSM Association, 2013, s. 3).

1.6 Spektrum Paylaşımı

Spektrum paylaşımı, birden fazla kullanıcı kategorisinin aynı frekans bantlarını güvenli bir şekilde paylaşmasını sağlayarak radyo dalgalarının veya kablosuz iletişim kanallarının kullanımını optimize etmenin bir yoludur. Akıllı telefonlar, nesnelerin interneti (IoT), askeri ve kamu güvenliği radyoları, giyilebilir cihazlar, akıllı araçlar ve diğer sayısız cihaz; veri, ses ve görüntüleri paylaşmak için elektromanyetik spektrumun aynı kablosuz bantlarına bağlıdır (National Institute of Standards and Technology, 2022). Radyo

dalgalarının kullanımındaki bu yoğunluk spektrum paylaşımı yaklaşımlarını zorunlu hale getirmektedir. Tuna ve Karagöz (2012) spektrum paylaşımını; spektrumda yönetme istemiyle seçilen bir kanala diğer kullanıcıların erişimi amacıyla koordinasyonun sağlanması ve iletim bandının paylaşılması işlemi olarak tanımlamıştır (s. 29).

Teknolojik gelişmeler spektruma olan ihtiyacı gün gün arttırmaktadır. Bu bağlamda spektrumun kısıtlı oluşu daha büyük bir sorun haline gelmektedir. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde bulunan Carnegie Mellon Üniversitesi'nde yapılan ölçümler, değerli spektrumun çoğunun herhangi bir anda ve herhangi bir yerde, boşta olduğunu göstermiştir (IEEE, 2005, s. 10). Aynı şekilde ABD'nin Federal Haberleşme Komisyonunun (FCC) yaptığı araştırmalar sonucunda mevcut radyo spektrumunun aktif ve verimli olarak kullanılmadığı ortaya çıkmıştır (IEEE, 2005, s. 10).

Geleneksel olarak radyo spektrumu kullanımı, her ülkede belirli düzenleyici kuruluşlar tarafından belli bir ücret karşılığında spektruma özel erişim sunan lisanslar verilerek, sabit bir spektrum atama politikasıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak lisans sahipleri iletim yapmadığında, bu bahsi geçen spektrum boşta kalmaktadır. Yeni teknoloji, uygun spektrum politikalarının benimsenmesi koşuluyla, yenilikçi yeni ürün ve hizmetleri açığa çıkararak çok daha fazla spektrum paylaşımını mümkün kılacaktır (IEEE, 2005, s. 10).

Spektrum paylaşımı farklı şekillerde yapılabilmektedir. Spektrumun aynı operatörle veya başka operatörle paylaşımı ya da lisanslı spektrumun lisanssız kullanıcılarla paylaşımı gibi örnekler verilebilir. Hücresel kullanıcıların özel amaçlı kullanıcılarla spektrum paylaşması, lisanslı ve lisanssız kullanıcılar arasındaki spektrum paylaşımına bir örnektir (Baby & James, 2016, s. 614).

Bu noktada spektrum paylaşımı veya spektrum ticareti gibi spektruma erişimi iyileştirmek amaçlı yöntemler gerçekten ne zaman gereklidir sorusu akıllara gelmektedir. Paylaşımın ne zaman gerekli olduğu sorusunun cevabı kavramsal olarak oldukça basit gözükmektedir. Spektrum için yeterli talep olduğunda ve bu durum spektrumda tıkanıklığa neden olduğunda spektrum paylaşımı gereklidir (ITU, 2008, s. 13).

Spektrumda daha fazla kullanıcıya, daha esnek şekilde erişim sağlamak için spektrumu paylaşmanın genellikle birkaç yolu vardır. Bunlar; spektrum haklarının tahsisi için liberalleştirilmiş yöntemler olan spektrum kiralama, spektrum ticareti ve spektrum müşterekleri yaklaşımı (spectrum commons) gibi yeni teknolojileri kullanarak parazit oluşumunu engellemeye çalışan dinamik spektrum erişimi yöntemleridir (ITU, 2008, s. 14).

Spektrum kiralama; FCC (2021) tarafından spektruma erişimi arttırmak için, ikinci el pazarına girişin önündeki engelleri kaldırarak pazarın daha etkin çalışması maksatlı

yapılan düzenlemeler olarak tanımlanabilmektedir. İlk tahsiste 10 yıl süreyle geçerli olacak şekilde ihale yöntemi ile verilen lisansların sahipleri; raporlarla tanımlanan kiralamaya uygun hizmetlerde, sürekli transfer edilmemek kaydıyla, sahip olunan spektrumun tamamı veya bir kısmını lisansın geçerlilik süresinin herhangi bir parçası için kiralayabilmektedir. Spektrum kiralama, coğrafi alan ve zaman bazlı olarak yapılabilmekte ancak kontrol daima lisans sahibinde olmaktadır (FCC, 2003, s. 2).

Spektrum ticareti; radyo frekansı spektrumunu kullanmak için belirli hakların bir kullanıcıdan diğerine devredilmesine izin veren bir süreçtir. Bu süreç spektrum kullanımına ilişkin haklar ve ilgili yükümlülüklerin belirli bir fiyat karşılığında aktarılabileceği bir mekanizma sağlamaktadır (ITU, 2016, s. 163).

Spektrum müşterekleri teorisi, telekomünikasyon için ayrılan radyo spektrumunun devlet veya özel kurumlar tarafından düzenlenmesindense doğrudan kullanıcıları tarafından yönetilmesi gerektiğini belirten bir yaklaşımdır. Özellikle kısa menzilli kullanım için bazı spektrumların (BlueTooth, RFID'ler, mikrodalga fırınlar, çeşitli uzaktan kumanda cihazları, kablosuz güvenlik sistemleri vb.) hiçbir şekilde lisanslanması gerekmez. Bu, kullanıcıların birbirine müdahale etmediği durumlarda veya meydana geldiği anda parazitle başa çıkabilen yeni teknolojilerin kullanılabildiği durumlarda söz konusu olabilir. Eğer böyle bir birliktelik sağlanabilirse, spektrum müşterekleri yaklaşımı talep edilir (Cave vd., 2011, s. 37).

1.6.1 Hangi Bantlar Paylaşılabilir?

Radyo spektrumunun kullanımı, insanların ve kuruluşların iletişim kurma, işlerini yürütme ve kendilerini eğlendirme biçimlerinde büyük değişikliklere neden olmuştur. Radyo dalgalarının sınırsız yayılımı dolayısıyla düzenleyiciler spektrum alanında farklı kullanım türlerini ve farklı kullanıcı gruplarını birbirinden ayırmaya odaklanmıştır. Bununla birlikte, radyo spektrumu kullanımında birçok oyuncunun 30 ile 3.000 MHz arasındaki en çekici spektrum aralığında bir araya gelme konusunda güçlü bir arzusu vardır. Bu frekans aralığında, yayılım genellikle iyidir ve ulaşılabilir bant genişliği çoğu amaç için yeterlidir. Bu nedenle, bu spektrumun kullanımı bir şekilde paylaşılmalıdır. Benkler'e (1998) göre spektrumu paylaşımı, gelişen teknoloji vasıtası ile önceden düzenlemeler olmaksızın mümkün hale gelecektir (s. 6).

Bazı kullanıcılar tarafından coğrafi ayrımı koruyarak ve hizmetler arasında paraziti önleyen operasyonel kısıtlamalara sıkı sıkıya bağlı kalmayı sağlayarak paylaşılan frekans

bantları vardır. Mikrodalga bağlantılarının yatay olarak iletildiği ve sistemler arasındaki etkileşimin sınırlı olduğu yerlerde uydu ve sabit bağlantılar tarafından paylaşılan spektrum buna iyi bir örnektir (ITU, 2008, s. 14). İlave olarak, sabit ve mobil hizmetler de spektrum bantlarını paylaşır ve bunu coğrafi ayrımı ve güç sınırlarını koruyarak yaparlar.

Hali hazırda birçok bant yeterince kullanılmamaktadır ancak potansiyel olarak tüm bantlar paylaşılabilir. İdari araçların farklı kombinasyonlarını kullanarak tüm bantların paylaşılabilmesinin teknik açıdan uygulanabilir olduğu değerlendirilmektedir. Burada idari araçlardan kasıt; frekans atamaları ve zaman, coğrafya ve enterferans yönetimi kısıtlamalarıdır. Teknik olarak ise filtreler, akıllı antenler, akıllı vericiler (SDR ve bilişsel radyo gibi) ve iletim gücü sınırlamaları gibi uygulamalar ön plana çıkmaktadır (ITU, 2008, s. 14).

1.6.2 Spektrum Paylaşımının İdari Yönetimi

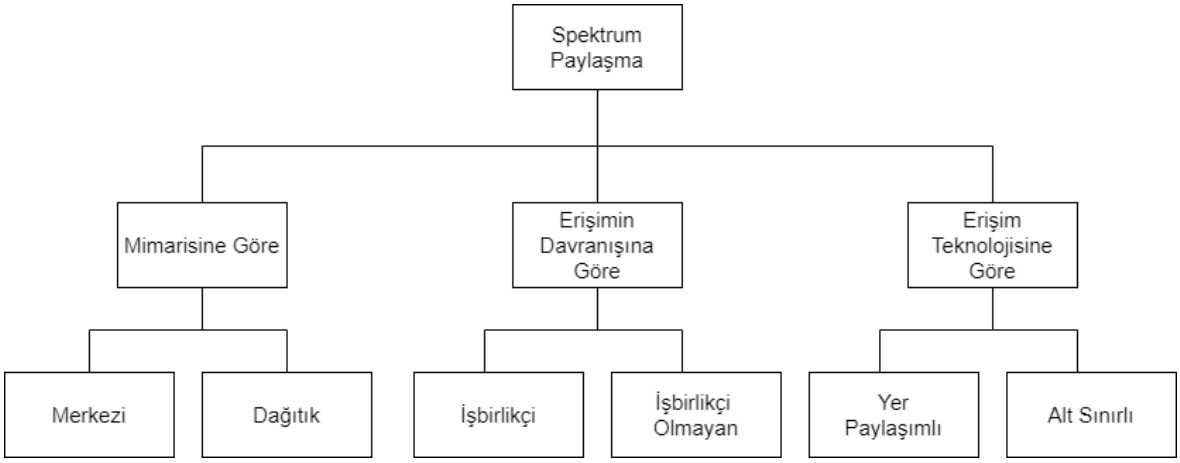
Spektrum paylaşımının idari yönetimi genellikle, paylaşımın nerede yapılması gerektiğini belirler. Ayrıca radyo sistemi performansı için uygulanacak paylaşım kurallarını ve uygulanabilir teknik standartları, ekipman özelliklerini ve ekipman tipi onayını tanımlayan düzenleyici süreçleri de içermektedir.

1.6.3 Mimarilerine Göre Spektrum Paylaşımı Teknikleri

Şekil 1.10'da görüldüğü üzere spektrum paylaşma teknikleri, mimarisine göre, erişimin davranışına göre ve erişim teknolojisine göre olmak üzere üç ana başlıkta toparlanabilmektedir. Mimari tabanlı olarak sınıflandırma bakımından, kullanıcılar arası dağıtık paylaşmanın merkezi paylaşma yöntemiyle benzerlik gösterdiği ancak veri iletim maliyetlerinde farklılıklar oluştuğu yapılan çalışmalar sonucu anlaşılmıştır (Tuna & Karagöz, 2012, s. 31).

Şekil 1.10

Spektrum Paylaşma Tekniklerinin Sınıflandırılması Gelecek Nesil Ağlar için Spektrum Tahsisinde Yeni Bir Yaklaşım: Bilişsel Radyo. Tuna & Karagöz, 2012, s. 31



Spektrum erişim davranışına göre yapılan sınıflandırmada işbirlikçi paylaşmanın genelde daha başarılı olduğu görülmektedir. İşbirlikçi yöntemin enerji tüketimi bağlamında daha verimli olmasının yanı sıra daha düzgün, tutarlı sonuçlar verdiği gözlenmektedir (Tuna & Karagöz, 2012, s. 31).

Erişim teknolojisi tabanlı olarak yapılan sınıflandırmada ise yer paylaşımlı yöntemde ikincil kullanıcılar, lisanslı kullanıcıların varlığında bu spektrumda iletime geçmezler ancak sadece birincil kullanıcılar iletimde değilken iletime geçerler. Alt sınırlı metotta ise ikincil kullanıcıların, birincil kullanıcıları enterfere etmeyecek şekilde iletim yapmaları söz konusudur (Tuna & Karagöz, 2012, s. 31).

1.7 Spektrum Yönetimi Ekonomisi

Hem tükenmemesi hem de petrol ve su kaynakları gibi depolanamaması sebebiyle elektromanyetik spektrum sıra dışı bir kaynak olarak değerlendirilmektedir. Yeni teknolojilerin artan kullanımı, bir ülkenin iletişim altyapısını ve ülke ekonomisini geliştirmek için muazzam fırsatlar üretir. Ayrıca, devam eden teknolojik gelişmeler, çeşitli yeni spektrum uygulamalarına kapı açmıştır. Bu gelişmeler, genellikle spektrum kullanımını daha verimli hale getirmekle birlikte, sınırlı spektrum kaynağına daha fazla ilgi ve talebi teşvik etmiştir. Spektrumda kullanım artışına bağlı olarak ise zaman zaman tıkanmalar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, spektrumun verimli ve etkin yönetimi, spektrum

kaynağının temsil ettiği fırsatlardan en iyi şekilde yararlanmak için çok önemli olmakla birlikte, daha karmaşık hale gelmektedir (Blackman & Srivastava, 2013, s. 95)

Doluluk ve veri oranı; spektrumun mümkün olan en iyi şekilde kullanılmasını ifade eden teknik verimlilik ölçüleri olarak değerlendirilmektedir. Doluluk, spektrumun ne oranda kullanıldığının zamana göre bir ölçümü; veri oranları ise belirli bir spektrum kapasitesinden ne kadar veri ve bilginin iletilebileceğinin tespiti açısından teknik bir verimlilik ölçümü olarak kullanılabilir (Blackman & Srivastava, 2013, s. 96).

Geliştirilmiş veri işleme yetenekleri ve mühendislik analiz yöntemleri, spektrum kaynağına erişim arayan kullanıcı sayısını ve çeşitliliğini barındırmanın anahtarıdır. Spektrum kaynağının verimli ve etkin bir şekilde kullanılması için, mevcut spektrumun paylaşımının kullanıcılar arasında ulusal sınırlar içinde ulusal düzenlemelere ve uluslararası kullanım için Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'nin (ITU) Radyo Düzenlemelerine (RR) uygun olarak koordine edilmesi gerekmektedir (ITU, 2016, s. 10).

Her ulusun spektrum kaynağından tam olarak yararlanabilmesi, büyük ölçüde radyo sistemlerinin uygulanmasını kolaylaştıran ve uyumlu çalışmasını sağlayan spektrum yöneticilerine bağlıdır. Ayrıca, radyo frekanslarına olan talep ile spektrumun mevcudiyeti arasındaki dengesizlik, özellikle kentsel alanlarda büyümeye devam etmektedir. İktisat teorisine göre talep arzı aştığında bir fiyat sistemi uygulanmalıdır. Frekans spektrumu kıt bir kaynak olduğundan, spektrum yönetimi ile ilgili kararlarda ekonomik bakış açısı da dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, ulusal spektrum yönetimini iyileştirmek için ekonomik yöntemler de dahil olmak üzere mevcut tüm araçlara ihtiyaç vardır (ITU, 2016, s. 10).

Ulusal spektrum yönetimini çeşitli şekillerde geliştirmek için piyasa temelli yaklaşımlar kullanılabilir. Terimden de anlaşılacağı gibi, bu yaklaşımlar ekonomik verimliliği teşvik ettiği gibi teknik ve idari verimliliği de teşvik etmektedirler. Spektrum da dahil olmak üzere herhangi bir kaynak için, birincil ekonomik amaç, o kaynaktan elde edilebilecek topluma sağlanan net faydaları maksimize etmektir (ITU, 2016, s. 16).

Spektrum yönetimiyle ilgili ikinci bir ekonomik amaç, kaynak rantının yakalanmasıdır. Ekonomistler, spektrum, petrol veya kereste olsun, bir kaynağın değerini “rant” olarak sınıflandırmaktadır. TDK’ya göre getirim olarak tanımlanan rant; bazı kaynaklara göre bir işe yatırılan paranın veya kirâya verilen bir toprağın, bekletilen bir gayrimenkūlün belirli süre içinde emek verilmeden sağladığı gelir olarak tanımlanmaktadır (Türk Haber Portalı, 2022).

Yerden petrol çıkarma hakları veya imtiyazları, bu petrolü tüketicilere satabilen veya araçlarına yakıt sağlamak için kullanabilen şirketler için değer taşımaktadır, aynı

şekilde radyo spektrumunu kullanma hakkı veya ayrıcalığı da kablosuz hizmetler satabilen bir spektrum kullanıcısı için değer taşır. Spektrum lisansı da dahil olmak üzere bir kaynağa tahakkuk eden rant, kaynağın açık bir piyasada getireceği fiyatla ölçülebilmektedir (ITU, 2016, s. 16).

Spektrumun değeri kıtlık rantı ve farklılık (diferansiyel) rantı olmak üzere iki içsel ranta yansımaktadır. Kıtlık rantı, kıt olan kaynakların mülkiyetine sahip olanların, bu kaynaklara sahip olmaktan dolayı elde ettikleri rant olarak tanımlanmaktadır. Spektrum talebi, en azından belirli bantlarda ve belirli zamanlarda arzı aşmaktadır. Bu durumda spektrumun değerine kıtlık rantının yansıdığı söylenebilmektedir (ITU, 2016, s. 16).

Farklılık rantı ise Ricardo'ya göre topraklar arasındaki verimlilik farkına dayanarak açıklanan ranttır ("Klasik Rant Kuramları," t.y.). Her bir frekans bandı, onu belirli hizmetler için uygun kılan belirli yayılma özelliklerine sahiptir. Bu durumda ise farklılık rantının, spektrumun değerine yansıdığı söylenebilir. En uygun frekans bandına erişim, uygulama maliyetini en aza indirebilir ve bir radyo sisteminin performansını optimize edebilmektedir. Ucuz ekipman kullanılarak birçok farklı hizmet için uygun olan bantlar, pahalı ekipman kullanılarak tek tip hizmet için uygun olan bantlardan daha değerlidir (ITU, 2016, s. 16).

1.7.1 Spektrum Yönetiminin Ekonomik İlkeleri

Spektrum paylaşımında düzenleyicilerin ana hedefleri, hem optimum spektrum doluluğunu hem de etkin frekans kullanımını güvence altına almaktır. Ayrıca spektrum bir bütün olarak ulusal topluluğun çıkarları doğrultusunda yönetilmelidir (ITU, 2016, s. 14).

5809 sayılı Elektronik Haberleşme Kanunu'nun "Yetkilendirme ücreti" başlıklı 11'inci maddesinin birinci ve ikinci fıkralarında; "(1) Yetkilendirme ücreti, idarî ücretler ve kullanım hakkı ücretlerinden oluşur." hükmü yer almaktadır. İdari ücretler ile spektrum kullanım hakkı ücretlerinin gerekçeleri ve uygulandıkları amaçlar farklıdır. Dolayısıyla bu farklılık, her bir ücret türünün belirlenmesi için iki farklı yaklaşıma yansıtılmalıdır. İdari ücretlerin yegane amacı; spektrum planlama, yönetim ve izleme faaliyetlerinden kaynaklanan tüm maliyetleri karşılamak için verilen hizmetin bedelini ödemek olmalıdır (ITU, 2016, s. 14). Buna karşılık, spektrum kullanım hakkı ücretlerinin amacı;

- yetkililer tarafından belirlenen bütçe hedefine ulaşılmasını sağlamak zorunda oldukları,

- ulusal kalkınma ve yeni hizmetlerin geliştirilmesine ilişkin olarak yetkililerin ekonomik hedefleriyle çelişmemeleri gerektiği,

- kullanıcıların spektrumdan elde ettikleri tüm faydaları hesaba katmaları gerektiği,

- spektrum yönetimi için bir araç oluşturmaları gerektiği için çok yönlü olarak değerlendirilmektedir (ITU, 2016, s. 14).

Spektrum kullanım hakkı ücretleri, devlet ve spektrum yöneticisi için mali kaynak oluşturmaktadır. Belirlendikleri düzey ise sistematik olarak enflasyonu ve spektrum yöneticisinin bütçesinin gelişen durumunu hesaba katmalıdır (ITU, 2016, s. 14).

Spektrum kullanıcılarına gerekli görünürlüğü ve yasal güvenliği sağlamak için ücretlerin belirlenmesine ilişkin kurallar zaman içinde nispeten istikrarlı olmalıdır. Tahsis edilen frekans kullanıcıları, ödedikleri ücret karşılığında yürürlükteki mevzuat hükümleri çerçevesinde korumadan yararlanırlar. Buna karşılık, serbestçe erişilebilen frekansların kullanıcıları (örneğin, düşük menzilli ve düşük güç setleri, WiFi, Bluetooth, amatör radyo ve radyo kontrollü modeller için kullanılır) korunmaz ve bu nedenle ücret ödemeleri gerekmemelidir (ITU, 2016, s. 14).

1.7.2 Spektrum Ticareti

Spektrum ticareti, radyo frekansı spektrumunu kullanmak için belirli hakların bir kullanıcıdan diğerine devredilmesine izin veren bir süreçtir. Bu süreç spektrum kullanımına ilişkin haklar ve ilgili yükümlülüklerin belirli bir fiyat karşılığında aktarılabileceği bir mekanizma sağlamaktadır (ITU, 2016, s. 163).

Geleneksel yaklaşımla; frekans bantlarını farklı bir kullanıcıya atamak için spektrumun, spektrum yöneticisine geri atanması ve ardından yeni bir hizmet için tekrar atanması gerekmektedir (Cave & Webb, 2015, s. 113). Spektrum ticareti sürecinde ise spektrumun yeniden tahsisinin aksine, söz konusu spektrumu kullanma hakkı tamamen ya da kısmen, mevcut spektrum kullanıcısından gönüllü olarak yeni spektrum kullanıcısına bir ücret karşılığında devredilir (ITU vd., 2014, s. 16).

Spektrum ticareti yalnızca, spektrum yeni kullanıcı için eski kullanıcıdan daha değerliyse gerçekleşir ve yeni kullanıcının elde edilen spektrumdan elde etmeyi beklediği daha büyük ekonomik faydayı yansıtır. Spektrum ticaretinin spektrumun ekonomik anlamda daha verimli kullanılmasına ve kullanıcılar arasında spektrum kaynakları akışı sağlayarak, spektruma daha hızlı erişim sağlanmasına katkıda bulunabileceği varsayılmaktadır. Bu

durumda spektrum ticareti, pazara yeni girenlerin spektrum elde etmelerini ve işlerini geliştirmelerini kolaylaştırır. Aynı zamanda yerleşik şirketler de pazara yeni girenlerin tehdidini savuşturmak amacıyla yeni teknolojiye yatırım yapmaları konusunda teşvik edilmiş olur (Cave & Webb, 2015, s. 113).

Bu nedenle, spektrum ticareti, yenilikçiliği, risk almayı ve spektrum dahil girdilerin verimli kullanımına yönelttiği için dinamik verimliliği teşvik eden bir süreçtir. Aslında, spektrum kullanıcıları, mal ve hizmetlerini sunmak için spektrum ve diğer üretim faktörlerinin en verimli kombinasyonunu dinamik olarak seçerek maliyetleri en aza indirebilir. Bir diğer önemli nokta işlem maaliyetlerinin düşük tutulmasıdır. Aksi halde hızlı ve ucuz bir mekanizma kurarak transferleri kolaylaştırmayı hedefleyen süreç verim elde edemeyecektir (Cave & Webb, 2015, s. 1

BÖLÜM 2

2.BLOK ZİNCİR TEKNOLOJİSİ

Bu tezin ikinci bölümünde blok zincir teknolojisinin temel özellikleri irdelenmiştir. Bu durumun temel sebebi, tezin devamında RTÜK iznine tabi spektrumun yayıncılık ve potansiyel diğer hizmetlerin ortak kullanımına sunulması maksadıyla, spektrum paylaşımlarına dair modern yaklaşımların blok zincir bakış açısıyla incelenecek olmasıdır.

2.1 Blok Zincir Teknolojisine Genel Bakış

Son yıllarda kripto paralar oldukça popüler hale gelmiştir. Blok zincir ise en bilinen kripto para birimi olan Bitcoin'in de uygulanmasını sağlayan genel teknolojinin adıdır (Durukal, 2021, s. 7). Ayrıca bu teknoloji, aracı gerektiren durumlarda merkezi otoriteye ihtiyaç duymadan değer alışverişi yapılabilen bir güven mimarisi olarak da tanımlanmaktadır (Werbach, 2021, s. 42). Veri kaydetme yöntemi olarak bloklar kullanılır. Bloklar değiştirilemez ve her bir blok kendinden bir önceki bloğu işaret eder. Zincirleme yapısı ve kendine has kuralları dışında bir veri tabanından farksızdır (Sarmah, 2018, s. 23).

Bir bilgisayar sisteminde elektronik olarak depolanan yapılandırılmış bilgi veya veriden oluşan düzenli koleksiyonlar veri tabanı olarak tanımlanmaktadır ("Veritabanı Nedir?," t.y.). Ancak standart bir veri tabanında kayıtlı verilerin değiştirilmesi özel yetkilere bağlıyken, blok zincir bir yetki anlayışından bağımsız olarak kriptolojik şifrelerle kendi kendini denetleyen bir mimari sunmaktadır (Sarmah, 2018, s. 24).

2.1.1 Blok Zincir Nasıl Ortaya Çıktı?

Son yıllarda Bitcoin ile bilinen blok zincir teknolojisi temelde bir veri tabanı olarak tanımlanmaktadır. Tarihsel kökeni 'dağıtık kayıt tutma' teknolojisine dayanmaktadır.

2008 yılında ekonomik kriz dolayısıyla yaşanan sorunlara tepki olarak, bir internet kriptografi grubuna, Satoshi Nakamoto takma isimli bir kişi ya da bir grup tarafından dokuz sayfalık "Bitcoin: Eşler Arası Elektronik Nakit Ödeme Sistemi" başlıklı bir belge gönderilmiştir. Sonuç kısmı "Elektronik işlemler için güven gerektirmeyen bir sistem

önerdik" cümlesi ile başlayan bu belge, bazı kaynaklarda bir makale olarak da nitelendirilmektedir. Makalede temel olarak dijital, kopyalanması zor, çok taraflı, merkezi bir onaylamaya ya da güvene bağlı olmayan para aktarım sistemi önerilmiştir (Sarmah, 2018, s. 24) Nakamoto, 2010 yılı ortalarına kadar teknik anlamda Bitcoin ekosisteminin gelişmesini desteklemiş, ancak kişisel bilgilerini açıklamamıştır, ardından projeden desteğini çekerek ortadan kaybolmuştur (Ünal & Kocaoğlu, 2018, s. 54).

Bitcoin'in mimari Satoshi Nakamoto'nun kim olduğu hala bilinmemektedir, ancak merkeziyetsiz bir para aktarım yapısı sunulan makalenin yazarının takma isim olarak, Japonca'da "merkezden doğan" anlamına gelen Nakamoto kelimesini kullanması dikkat çeken bir durum olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda içlerinde akademisyenlerin de bulunduğu bir grup Satoshi Nakamoto kelimelerinin Japonca karşılıklarını inceleyerek Bitcoin'in, Amerikan Merkezi İstihbarat Teşkilatı'nın (CIA) bir projesi olduğunu savunmaktadırlar (Güven & Şahinöz, 2018, s. 155-156).

2.1.2 Bitcoin ve Kripto Paralar

Bitcoin, karşılığı parasal bir değer olan bir bilgisayar kaydının kriptografi yöntemi kullanılarak şifrelenmesi ile oluşan kripto para olarak tanımlanmaktadır (Güven & Sahinöz, 2018, s. 29). Kripto para kavramını ise Avrupa Merkez Bankası (ECB); herhangi bir merkez bankası, kredi kuruluşu ya da e-para kuruluşu tarafından ihraç edilmediği halde, bazı durumlarda paranın yerine kullanılabilen bir varlığın dijital temsilidir, şeklinde açıklamıştır (ECB, 2015, s. 6).

Kripto para kavramının, paranın tarihi yolculuğu ile birlikte ortaya çıktığı değerlendirilmektedir. Altın para milattan önce 700'den beri değer saklama aracı, mübadele aracı ve ölçü birimi olarak kullanıla gelmiştir (Head, 1901). Altın madeninin bölünebilir, uzun ömürlü, az bulunur olması ve içsel değeri nedeniyle genel kabul görüyor olması altının geçmişte para olarak kullanılmasındaki etkenlerdir. Ancak nüfus ve ticaret hacminin artması altın arzının yetersiz gelmeye başlamasına sebep olmuş, karşılığı altın olan, istenildiği takdirde altına çevrilebilen temsili paralar kullanılmaya başlanmıştır. Paranın değerinin altın veya gümüş gibi kıymetli madenlere bağlanması; para arzının hükümetin altın rezervleriyle sınırlandırılması olarak tanımlanan ve 1821'den itibaren uygulanan altın standardı, altın rezervinin ekonomik büyümeye uyum sağlayamaması sebebiyle 1920 ve 1970'li yıllar arasında çökmüştür (Tabak, 2002, s. 1-2).

Altın standardının çökmesiyle, 1944 yılında dünya para sisteminin altına endeksli tek para birimi olan dolara bağlı olarak yönlenmesi esas alınan, Bretton Woods sistemine geçilmiştir. Bu sistemle neredeyse bütün ekonomiler itibari para olarak adlandırılan kâğıt parayı tercih etmeye başlamışlardır. Arzı kontrollü olan bu sistem 1971 yılında sona ermiş ve kağıt paranın resmi altın konvertibilitesi de bitmiştir (Güven & Şahinöz, 2018, s. 155-156). Günümüzde para, merkez bankalarının insiyatifine bağlı olarak ihraç edilmekte; değeri para politikalarıyla paralel olarak değişmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle itibari paralar banka kayıtları olarak tutulmaya başlanmış ve hayatımıza dijital para, sanal para ve elektronik para gibi kavramlar girmeye başlamıştır (Güven & Şahinöz, 2018, s. 194-195).

Bitcoin arzının sabit olması ve herhangi bir merkezi otoriteye bağlı olmaması sebebiyle altına benzetilmektedir. Altın ve Bitcoin için fiyatı ekonomik aktörlerin beklentilerine bağlı olarak oluşan arz-talep dengesi belirlemektedir (Güven & Şahinöz, 2018, s. 198). Ancak altının madeni değerinin oluşu, kolay taşınabilir ve bölünebilir olmaması ve dolayısıyla ödemeler için pek uygun olmaması Bitcoin'den ayrılan özellikleridir (Güven & Şahinöz, 2018, s. 200).

2.2 Blok Zincirde Temel Yapı Taşları

Blok zinciri standart bir veri tabanından ayıran özellikleri, blok zincirin oluşturulduğu mimariden ileri gelmektedir. Bu başlıkta blok zincir mimarisini oluşturan temel yapı taşları incelenmiştir.

2.2.1 Blok Zincir ile Kayıt Sistemi

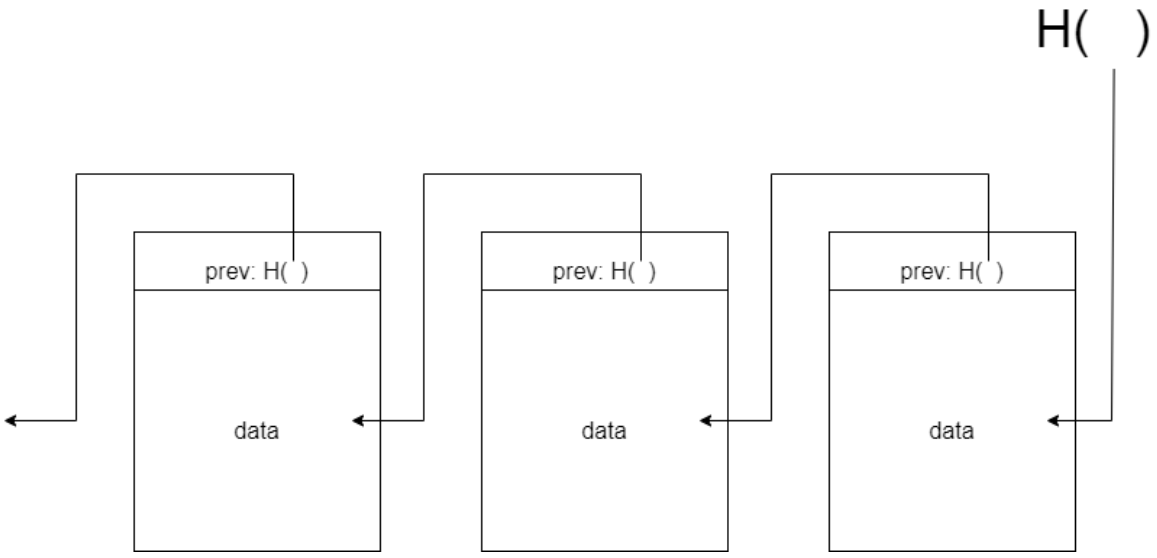
Blok zinciri; listenin her elemanın kendinden önceki elemanı işaret ettiği tek bağlı bir liste yapısıdır. Listenin ilk elemanından son elemanına kadar bütün elemanlar birbirine bu şekilde bağlıdır (Ünal & Kocaoğlu, 2018, s. 55). Bu elemanlar blok zincir yapısında "blok" olarak adlandırılır ve zincirdeki ilk bloğun adı "Genesis Blok"tur (Narayanan ve ark., 2016, s. 33).

Başlangıç bloğundan önce bir blok bulunmadığından, bu bloğa yaratıcısı tarafından bir değer atanır ve bu değer genellikle 256 adet 0'dan oluşur. Her bloğun birbirini işaret edebilmesi, blokların bir önceki bloğun kriptolojik olarak özetini barındırması ile gerçekleşir. Bu kriptolojik özete "hash" denilmektedir. Bu bağlamda blok zincir özel

işaretleyicilerle (kriptolojik hash fonksiyonları) oluşturulmuş, özel bağlı bir liste yapısıdır (Narayanan ve ark., 2016, s. 35).

Şekil 2.1

Blok Zinciri Veri Yapısı Blok Zinciri Teknolojisi: Kullanım Alanları, Açık Noktaları ve Gelecek Beklentileri. Ünsal & Kocaoğlu, 2018, s. 55



Blok zincirde kendine işaret eden her ön bloğa "ebeveyn blok (parent block)" adı verilir. Başlangıç bloğu dışında her bloğun bir adet ebeveyn bloğu vardır (Güven & Şahinöz, 2018, s. 54). Şekil 2.1'de zincirdeki blok yapısı, önceki ve sonraki blokların bu yapıdaki yeri anlatılmıştır.

2.2.1.1 Blok Nedir?

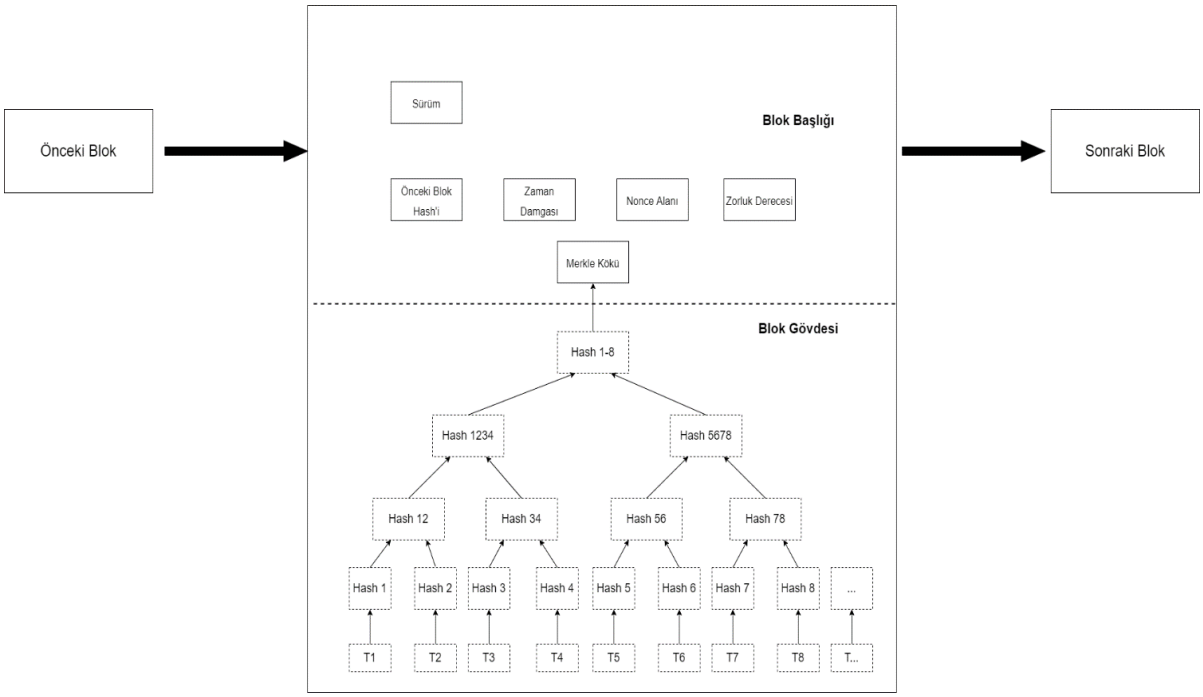
Verilerin belirli kriptolojik şifrelemeler kullanılarak birleştirildiği veri tabanı yaprağına blok adı verilir (Cryptech Kriptoloji L aboratuvarı, 2018, s. 2). Bloklar kronolojik sıraya göre birbirlerine bağlıdır.

2.2.1.2 Blok Yapısı

Her blok; blok başlığı ve blok gövdesi (içerik) denilen iki temel kısım içerir. Blok başlığının blokların birbirine bağlanmasında kritik bir görevi vardır. Blok başlığı altı parametre içermektedir ve bunlar: Sürüm, Önceki Blok Hash'i, Merkle Kökü Hash'i, Zaman Damgası, Zorluk Derecesi ve Nonce Alanı olarak sıralanabilir. (Güven & Sahinöz, 2018, s. 55). Şekil 2.2'de bu yapının görseli yer almaktadır.

Şekil 2.2

Bitcoin'in Blok Yapısı State-of-the-Art and Future Trends of Blockchain Based on DAG Structure Bai, 2019, s. 185



2.2.1.3 Sürüm (Version)

Her blok zincir belirli bir kurallar bütününe (konsensüs kuralları, konsensüs algoritması) göre yürütülür. Uyulması gereken kurallar blok yapısı, uzunluğu, bloktaki kayıtların şekli ve alanların sırasına ilişkin standartlar olabilir. Standartlar fikir birliğiyle ya da büyük bir grubun uzlaşısı eşliğinde değişiklik gösterebilir. Bu durumda yeni standartların zincirin başından itibaren mi yoksa ilgili bloktan sonra mı devam edeceği sürüm numarasına

göre uygulanır. Blok zincirin sürümüne göre çatallandığı durumlar vardır (Güven & Sahinöz, 2018, s. 56).

2.2.1.4 Önceki Blok Hash'i (Previous Block's Hash)

Bloklar birbirlerine hash değerleri ile bağlıdır. Bir blok oluşturulduktan sonra hash değeri hesaplanır. Bu hash değeri bir sonraki bloğun başlık bölümünde yer alır. Bloklar birbirlerine hash değerleri ile bağlı olduğundan, herhangi bir bloğa yapılan dışarıdan bir müdahale hash değerini bozarak aslında zinciri bozar. Böylece zincirde değiştirilemezlik özelliği sağlanmış olur (Güven & Sahinöz, 2018, s. 56).

2.2.1.5 Merkle Kökü (Merkle Root)

Merkle ağacı blok zincirin oluşumundaki en önemli yapılardan biridir. Merkle ağacı yapısında hash değerleri ters yönde dallanan bir ağaç şeklinde oluşturulmaktadır (Cryptech Kriptoloji Laboratuvarı, 2018, s. 2). Merkle ağacı yapısının kullanılmasının temel sebebi ise bir blok içindeki işlemler kümesini hızlıca doğrulayabilmektir. İlk olarak blok içindeki tüm işlemler ikili olarak gruplandırılarak, her bir grubun hash değeri hesaplanır. Hesaplanan hash değerleri tekrar ikili olarak gruplandırılır ve bu işlem en son iki adet hash kalıp onlar da eşleninceye kadar devam eder. Bu son işlem sonucunda Merkle Kökü ortaya çıkar (Güven & Sahinöz, 2018, s. 58). Bir blok içindeki herhangi bir işlemin değiştirilmesi hash değerlerinin ve dolayısıyla Merkle kökünün değişmesine sebep olur. Merkle kökünün değişmesi ise blok başlığının hash'inin değişmesi demektir. Ve bir sonraki bloğun girdisi olan bu değer değiştiğinde sonraki bloklar geçerliliğini yitirecektir (Rehmani, 2021, s. 36).

2.2.1.6 Zaman Damgası (Time Stamp)

Zaman damgası, blok zincir üzerinde bloğun üretildiği zamana dair elektronik olarak tutulan bilgisayar sistemindeki bir tarih ve saati ifade eder (Panda vd., 2021, s. 259). Bitcoin blok zincirinde Unix'in Epoch zaman formatı kullanılır ve bu format 1 Ocak 1970 GMT 00:00'dan itibaren kaç saniye geçtiğini göstermektedir (Güven & Sahinöz, 2018, s. 60). Zaman damgasının temel kullanım sebeplerinden biri de madencilik sürecinin

parametrelerini oluşturmaktır. Zaman damgaları, ağın belirli bir süre için blokları çıkarma işleminin ne kadar süreceğini belirlemesine ve oradan madencilik zorluk parametresini ayarlamasına yardımcı olur. Bitcoin için blok çıkarma süresi yaklaşık on dakikadır ("What is Timestamp?," 2022).

2.2.1.7 Zorluk Derecesi(Diffuculty Parameter)

Zorluk derecesi belirli bir blok zincirde bir blok çıkarmanın ne kadar zor olduğunun bir ölçüsüdür. Yüksek zorluk derecesi, bir blok zincirine girilen işlemleri doğrulamak için ek bilgi işlem gücü gerektirdiği anlamına gelir. Saldırganların kontrolü ele geçirmek için çok büyük kaynaklara ihtiyacı olacağından, bir blok oluşturmak için gereken zorluk ne kadar yüksek olursa, blok zincir ağının güvenliği o derece artar ("What is cryptocurrency difficulty?," 2018).

2.2.1.8 Nonce Alanı

Nonce alanı rastgele üretilen ve yetkilendirme amacıyla kullanılan bir sayıdır. “Yalnızca Bir Kez Kullanılan Sayı” (Number Only Used Once) ifadesinin kısaltılmış hali olan nonce, blok zincir teknolojisi dışında bilgisayar teknolojisinin farklı alanlarında da karşımıza çıkmaktadır (Günen, 2020).

2.3 Blok Zincirde Güvenlik

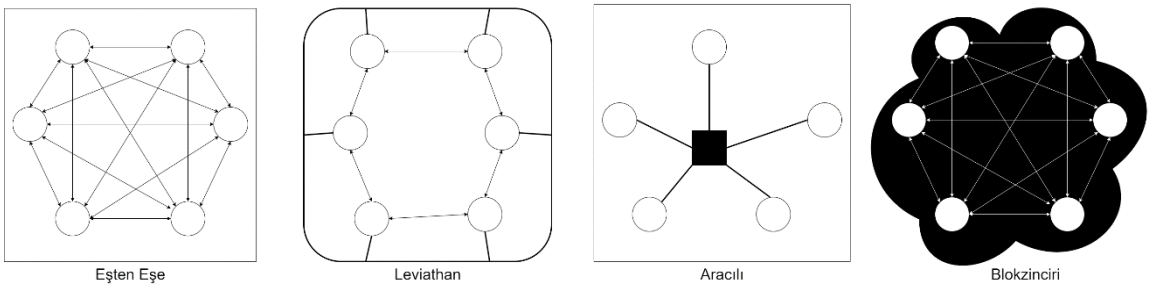
Mayer, Davis ve Schoorman (1995) güveni, bir tarafın başka bir tarafın eylemlerine karşı savunmasız olmaya rıza göstermesi olarak tanımlamıştır. Bu rıza savunmasız kalmayı kabul eden tarafın, eylemlerini izleme ve denetleme imkanı olup olmamasına bakmaksızın, karşı taraftan kendisi için önemli bir eylemin gerçekleştirileceği beklentisine dayalıdır (s.172). Botsman’a göre ise güven; bilinmeyenle olan kendinden emin bir ilişki, olarak tanımlanmaktadır (Botsman, 2020). Tanımlamalardan da çıkarılabileceği üzere güven kavramı temelde, başlı başına bir güvenlik zaafiyeti oluşturmaktadır.

Güvenlik açığı bırakmadan ve gücü başkalarına teslim etmeden bir güven mimarisi oluşturmak blok zincir teknolojisinin ilk örneği olan Bitcoin'in sunulma amaçlarından biridir. Mimari, bir sisteme şekil veren tasarım kararlarının bütünü olarak tanımlanabilir. Teknoloji bağlamında incelendiğinde ise sistem bileşenlerinin birbirleriyle etkileşim yollarını tarif etmektedir (Henderson & Clark, 1990, s. 10). Yerleşim yerlerinin fiziksel mimarisinin toplulukların karakterini belirlemesi gibi, iletişim ağlarının ve bilgi sistemlerinin dijital mimarisinin de yenilik fırsatlarını, yaratıcılığı ve çevrimiçi ifade özgürlüğünü şekillendirebileceği değerlendirilmektedir (Werbach, 2018, s. 39).

New York Üniversitesi dijital ekonomi uzmanı Arun Sundarajaran, tarihe bakıldığında dünyanın ekonomik faaliyetinde meydana gelen her büyük gelişmenin temelinde genel olarak yeni bir güven biçimi olduğunu söyler. Güvenin bir mimarisi olur mu sorusunun cevabı ise, güven ortamı oluşturmak amacıyla var olan kurumsal yapılardır (Werbach, 2018, s. 39). Blok zincir teknolojisi eşten eşe (P2P), leviathan ve aracılı gibi mevcut güven mimarilerinin hiçbirinin sunmadığı, Linkedln'in kurucusu Reid Hoffman'ın tanımıyla "güvencesiz güven" ortamı yaratmaktadır ("future of the bitcoin ecosystem and "Trustless trust" – Why I invested in Blockstream," 2014).

Şekil 2.3

Mevcut Güven Mimarileri ve Blok Zincirin "Güvencesiz Güven" Mimarisi The Blockchain and the New Architecture of Trust Werbach, 2018, s. 42



Blok zincir protokolü yalnızca Bitcoinlerin güvenilir değişimini sağlamakla kalmaz. Alan adı (domain), dijital sözleşmeler, dijital unvanlar gibi her türlü dijital varlığın, arabalar ve evler gibi fiziksel varlıklar ile güvenilir bir şekilde değiş tokuş edilmesini sağlar. Blok zincirinde depolanan dijital varlıklara çeşitli koşullar ve potansiyel eylemler eklemek de mümkündür. Böylelikle otomatik olarak yürütülebilir vasiyetler, temettü dağıtımları,

emanet ve noter hizmetleri gerçekleştirilebilir ("future of the bitcoin ecosystem and “Trustless trust” – Why I invested in Blockstream," 2014).

Bitcoin ve sunduğu güvene dayalı olmayan güven mimarisi hakkında daha da dikkat çekici olan şey, açık kaynak olması, hiçbir şirketin kendi yararına kontrol etmediği bir teknoloji, bir kamu malı olmasıdır. Bu özellik, Bitcoin'in bugüne kadarki değeri ve başarısının temelidir. Ancak bu aynı zamanda, sistemin kalbindeki yazılım olan Bitcoin Core'daki ilerlemelerin yavaş yavaş gerçekleştiği anlamına da gelir. Gönüllü geliştiriciler proje üzerinde boş zamanlarında çalışırlar. Değişiklikler, yalnızca Bitcoin geliştirme topluluğu arasında fikir birliği sağlandığında uygulanır ("future of the bitcoin ecosystem and “Trustless trust” – Why I invested in Blockstream," 2014).

Blok zincir mimarisinde güven soyuttur. Bir bitcoin fiziksel olarak var olmamakla birlikte, temelde dağıtık bir defterdeki dijital işlem kayıtlarından ibarettir. Günümüz teknolojisinde alışık olduğumuz bu duruma örnek olarak banka hesaplarımız verilebilir. Blok zinciri teknolojisi Bitcoin ile tanındığından ötürü, yalnızca bir finans teknolojisi olarak bilinmektedir. Başlangıç noktası finans olsa bile, zamanla diğer sektörlerde de bir dönüşüm yaratacağı beklenmektedir.

Tarihçi Yuval Noah Harari (2015) “para şu ana kadar yaratılmış en evrensel ve en etkili karşılıklı güven sistemidir” demiştir (s.185). Buradan hareketle parayı değerli kılan şeyin içsel değeri olmayıp, sağladığı güven sistemi olduğu söylenebilir. Paranın oluşturduğu güven sistemi Bitcoin ve aslında blok zincir protokolü ile benzerdir. Bitcoin temelleri ise kriptografi, dijital para ve dağıtık sistemler üzerine kuruludur.

2.3.1 Kriptoloji ve Hash

Kriptografi, verileri şifrelemek ve şifresini çözmek için matematiği kullanan güvenli iletişim bilimidir (PGP Corporation, 2002, s. 9). Kriptografinin gücü, matematiği kullanmasının bir getirisi olarak iddialarının kanıtlanabilmesindedir. Kriptografik algoritmalar gücü devamlı artan bilgisayarlar ile uygulanabilir (Güven & Sahinöz, 2018, s. 66-67).

Kriptografinin boyutlarından biri şifrelemedir. Blok zincirde şifreleme “hash” fonksiyonu ile uygulanır ve bu klasik anlamda bir şifrelemeden ziyade daha çok parmak izi

oluşturmaktır. Hash fonksiyonu, bir verinin özgünlüğünü kanıtlamak amacıyla kullanılan matematiksel bir fonksiyondur (Günen, 2020).

Veri yapısının destekleyici bir parçası olarak hash, blok zincirinin kullanılabilirliğini ve güvenliğini sağlamak için önemlidir. Hash fonksiyonu herhangi uzunlukta bir veriyi sabit uzunlukta bir veriye dönüştüren fonksiyondur. SHA224, SHA256, SHA384, SHA512, Blake2b, Blake2s ve MD5 gibi çeşitli hash fonksiyonları mevcuttur (Güven & Sahinöz, 2018, s. 50). İdeal bir hash fonksiyonunun ise beş önemli özelliği bulunmaktadır:

1.Belirli bir girdi için çıkan hash değeri her zaman aynı olmalıdır,

2.Fonksiyon çok hızlı çıktı üretmelidir,

3.Çıktıyı kullanarak girdiyi hesaplamak mümkün olmamalıdır,

4.Girdi verisine tek bir karakter eklemek veya değiştirmek bile hash değerini değiştirmelidir,

5.Farklı girdiler aynı sonucu üretmemelidir (Günen, 2020).

Blok içerisinde tüm kayıtların hash'leri ayrı ayrı hesaplanarak en sonunda bloğun hash'ine ulaşılır. Bir sonraki bloğun girdilerinden biri, üretilmekte olan bloğun hesaplanan hash değeridir. Dolayısıyla hash fonksiyonu blokları birbirine bağlayarak dokunulmaz bir blok zincir oluşturmada önemli bir rol oynamaktadır.

2.3.2 Merkle Ağacı Yapısı

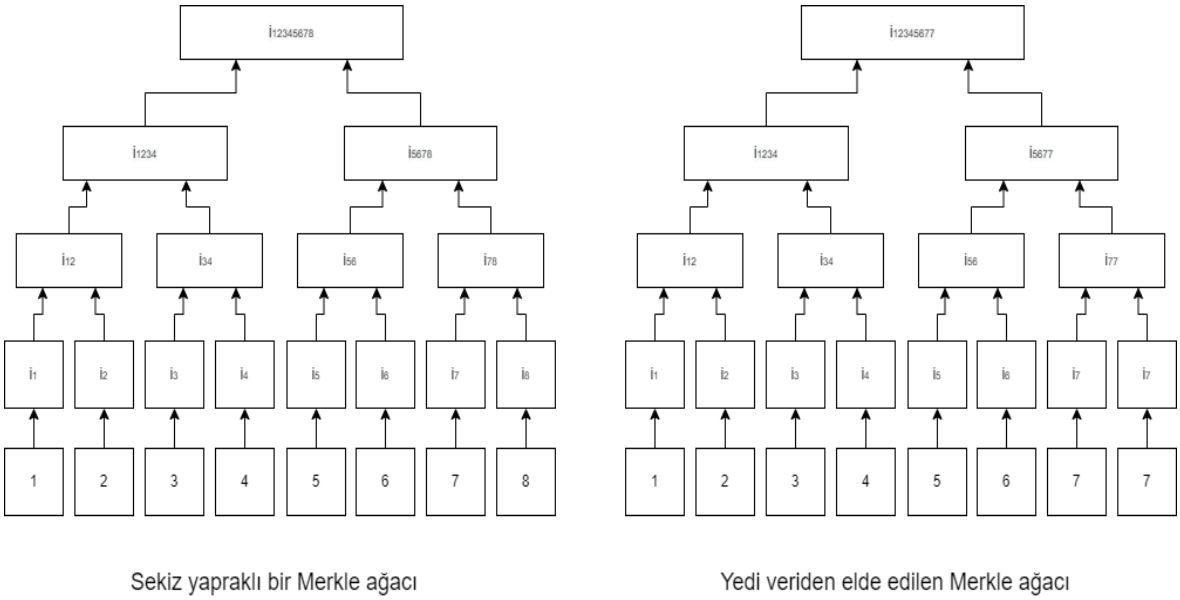
Merkle ağacı yapısı ve hash fonksiyonu blok zincirde blokların doğrulanması amacıyla işbirliği içindedir. Her bir blokta sekiz işlem bulunan bir blok zincirde (işlem sayısı aktif blok zincir protokolüne göre değişiklik gösterebilir) öncelikle işlemlerin hash'leri hesaplanır. Şekil 2.4'te yer alan sekiz yapraklı Merkle ağacında görüldüğü üzere, bu hash'ler ikişerli gruplandırılarak, Merkle kökü değeri hesaplanana kadar yeniden hash'lenmeye devam eder. Blok içinde 2^n ile ifade edilemeyecek bir sayı kadar işlem varsa, Şekil 2.4'te yer alan yedi yapraklı Merkle ağacında olduğu gibi, en az bir noktada ikili gruplandırılamayan bir hash değeriyle karşılaşılır. Ancak bu değer kendisiyle eşlenerek Merkle kökü hesaplanmaya devam eder (Cryptech Kriptoloji Laboratuvarı, 2018, s. 3) .

Bloktaki bir işlemin doğrulanabilmesi için tüm işlemlerin kontrolü yerine, kontrol edilecek olan işlem hash'lenir. Hash hesaplama adedi en fazla N'dir. N sayısı bloktaki işlem adedini gösterir. Bu logaritmik hesaplamadan elde edilen sayı yukarıya yuvarlanarak bir tam

sayı elde edilir ve bu tam sayının bir fazlası kadar adet hash hesaplaması işlem teyidi için yeterlidir (Güven & Sahinöz, 2018, s. 60).

Şekil 2.4

Sekiz ve Yedi Veriden Oluşan Merkle Ağaçları Blok Zinciri Bir Veri Tabanı Yapısı. Cryptech Kriptoloji Laboratuvarı, 2018, s. 3



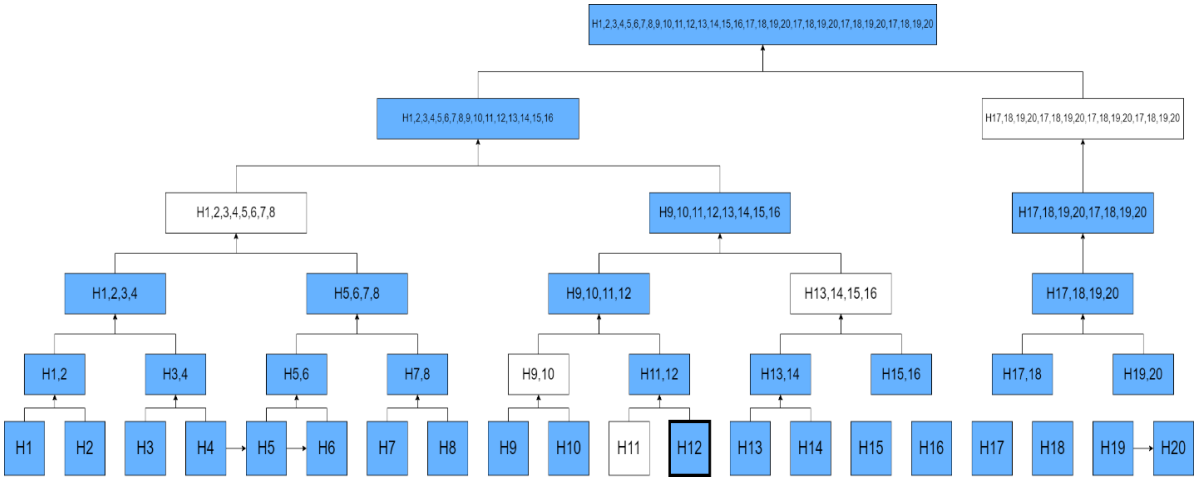
Sekiz yapraklı bir Merkle ağacı

Yedi veriden elde edilen Merkle ağacı

Şekil 2.5'te yer alan, içinde 20 adet işlem bulunan bir bloğu ele alırsak, 12 no.lu işlemin kontrolü için 12'nin hash'i ile 11'in hash'i birlikte hashlenir ve H(11, 12) elde edilir. Bir sonraki aşama için H(9, 10) ise kayıtlardan elde edilir. Böylelikle H(9, 10) ve H(11, 12) hashlenerek, H(9, 10, 11, 12) elde edilir ve bu değerin hashleneceği H(13, 14, 15, 16) ise kayıtlardan alınarak bu şekilde köke kadar devam edilir. Bu mekanizma ile blok içinde binlerce işlem olsa bile, doğrulama yapmak için 6-7 adet hash işlemi yapmanın yeterli olduğu görülmektedir.

Şekil 2.5

Teyit Edilecek İşlemin (12 no.lu işlem) Yolculuğu Blok Zincir Kripto Paralar Bitcoin. Güven & Sahinöz, 2018, s. 59



2.4 Madencilik (Mining)

Bitcoin özelinde madencilik yeni bitcoinlerin dolaşıma girdiği süreç ve aynı zamanda yeni işlemlerin ağ tarafından onaylanma şekli olarak tanımlanmaktadır ("How does bitcoin mining work?," 2017). Madenciler ise, Bitcoin işlemlerinin belirli bir kısmını doğrulama hakkı için kendi aralarında “madencilik” olarak isimlendirilen bir sürece dahil olurlar ("magic of mining," 2015).

Bitcoin’de her 10 dakikada bir madenciler tarafından blok üretilmesi hedeflenmektedir. 1 MB’ı geçmeyecek sayıda işlem, işlem havuzundan (memory pool veya transaction pool) seçilerek Merkle kökü hesaplanır. Sonrasında blok başlığının özeti madenci tarafından hesaplanmaya başlanır ve burada bitcoin protokolüne uygun bir hash yani özet hesaplanana kadar çeşitli nonce değerleri denenir. Madenciler uygun özet değerini bulmak için yarışır ve bloğu oluşturan madenci karşılığında bitcoin olarak ödül kazanır. Bitcoin arzı bu şekilde sağlanmaktadır (Güven & Sahinöz, 2018, s. 64).

Yeni bitcoinler ödül mekanizması aracılığıyla, üstelik zamanla üretimleri azalacak şekilde yaratılmaktadır. Toplam potansiyel Bitcoin’in yüzde 80’i 2017 yılına dek üretilmiştir. Hesaplamalara göre 2140 yılında bitcoin üretimi bitecek, dolaşımda toplamda 21 milyon bitcoin var olacaktır. Bu noktada madencilerin esas geliri ise işlem komisyonları haline gelecektir ("What is bitcoin halving? Definition, how it works, why it matters," 2020).

Bitcoin madenciliği ticari bir girişim olup yoğun işlem gücü gerektirir. Çıktısından elde edilen kar, girdilerine yapılan yatırıma bağlıdır. Madencilik sistemleri 7/24 çalışan sistemlerdir ve uygun hash değerini bulmak için trilyonlarca işlem yapılması gerekebilir. Bu yoğun işlem gücü yüksek enerji tüketimi anlamına gelir ancak buradaki asıl maaliyetin soğutma sistemleri olduğu değerlendirilmektedir ("How does bitcoin mining work?," 2017).

Madencilik sistemleri ise popüler anlayışın aksine masaüstü bilgisayarlar ya da normal oyun sistemlerinden farklıdır. Bu tür sistemler Bitcoin için uygun olmayıp, gelişen ekosistemde rekabete dayanıklı değillerdir. Bitcoin madenciliği Uygulamaya Özel Entegre Devre (ASIC) sistemleri yani sadece belli bir uygulamalarda çalışacak entegre devreler ile yapılmaktadır. Madenciler hash değeri hesaplamak için binlerce ASIC barındıran sistemleri düzenlerler. Bu durumun Bitcoin'in dağıtık yapısını olumsuz etkilediği değerlendirilmektedir ("How does bitcoin mining work?," 2017).

Bitcoin blok zincirinde aynı madencinin üst üste blok oluşturmasını engellemek amacıyla farklı mutabakat yöntemleri kullanılmaktadır. İş İspatı (PoW) ve Pay İspatı (PoS) en yaygın olan iki mutabakat sistemidir. Son yıllarda mutabakat sistemleri araştırmacılar tarafından enerji verimliliklerine yönelik incelenmeye başlanmıştır (Kostal vd., 2018, s. 207).

2.4.1 İş İspatı(PoW)

Bitcoin iş ispatı sistemi, tek yönlü fonksiyonlar içeren rastlantısal kriptografik bulmacaların yani hash'lerin madenciler tarafından çözülmesi işlemine dayanır. Bir dosyayı hash'e çevirmek kolay olsa bile hash'i orjinal dosyaya çevirmek meşakkatli bir deneme yanılma süreci gerektirir. Bu yöntem, bilgisayara iş yaptırma yöntemi olarakta bilinir. Satoshi Nakamoto, HashCash'i yani; Bitcoin sunuş metninden birkaç yıl önce yayımlanan ve spam e-postaları engellemek için kullanılabilen algoritma fikrinden yararlanarak bu çözümü geliştirmiştir (Back, 2002, s. 3).

Madenci, blok zincirine yeni işlemler içeren bir blok eklemek istediğinde, 'nonce alanı' yani bilgisayar dünyasında etkisi olmayan unsur olarak tanımlanan kısmı deneme yanılma yöntemiyle değiştirerek protokole uygun özet değerini bulmaya çalışmaktadır. Bitcoin'de ortalama on dakikada bir blok oluşturulacak şekilde, bu zorluk madenciliğe dahil olan madencilerin sayısı ve hesaplama gücüne göre dinamik olarak ayarlanmaktadır (Kostal vd., 2018, s. 207).

PoW madencilik planı her seferinde bir bloğu dikkate almak ve bir hesaplama yarışının ilk kazananına ödül vermek için tasarlanmıştır. Bu ödüllendirme sistemi kripto - ekonomik (cryptoeconomic) güvenlik adında yeni bir tanım ortaya çıkarmıştır ve kısaca ağa katılan tarafların defteri doğrulamak için ekonomik olarak teşvik edilmeleri olarak açıklanabilir. Kripto-ekonomik (cryptoeconomic) güvenlik kavramı halka açık blok zinciri ağlarının ayırt edici bir özelliği olarak karşımıza çıkar (Buterin, 2017).

Ancak bu durum ödülü kazanan madenci dışındakilerin gereksiz yere enerji tüketmesi sonucuna yol açmakta ve bu gereksiz enerji tüketimi her yeni blok hesaplanırken gerçekleşmektedir (Lasla vd., 2022, s. 1). Yapılan bir araştırmaya göre 2017'de Bitcoin fiyatının yükselmesiyle her işlem için, ABD'li bir ailenin evine bir hafta yetecek kadar enerjinin tüketildiği öne sürülmektedir (Malmo, 2017).

2.3.3 Blok Zincirde Yapısal Güvenlik

Bir veri tabanı olarak ele alındığında blok zincirde güvenlik, kayıtlı verilerin değiştirilememesi anlamına gelmektedir. Bilindik veri tabanlarında sistem kullanıcı yetkilerini kontrol ederek, kullanıcının veri değiştirme yetkisi olmadığında işlem yapmasına izin vermemektedir. Ancak blok zincirde böyle bir yetki söz konusu olmamaktadır (Narayanan vd., 2016, s. 6).

Zincirdeki her blok bahsi geçen hash fonksiyonları ve Merkle ağacı yöntemiyle, kriptolojik olarak korunmaktadır. Geçmiş bir kaydı değiştirmek söz konusu olduğunda, mevcut bloktaki en ufak değişiklik bu bloğun çıktı değerini değiştirecek, blokların birbirine bağlı olmasıyla bu durum zincirleme olarak tüm blokların geçerliliğinin yitirilmesine sebep olacaktır (Narayanan vd., 2016, s. 6).

Blok zincir ağında kopyalar bir değil birden fazla kullanıcı ağında tutulmaktadır. Bilgisayarın karşısına biri uzun diğeri daha kısa olmak üzere iki farklı zincir geldiğinde en uzun zincir, sistemin mutabakat dahilinde kabul ettiği kayıtları temsil eder (Narayanan vd., 2016, s. 6). Böylelikle ağdaki tüm kullanıcılar aynı blok zincir verisine sahip olmaktadırlar. Değişmiş zincirlerde bloklar geçerliliğini yitirecektir ve zincir kısalacaktır. En uzun zincirin kabul edilmesi ise bu duruma karşı iyi bir savunmadır. Fakat asıl engel zaman sınırlamasıdır. Satoshi'nin 2008'de önerdiği sistem blok üretiminin 10 dakika sürmesini hedeflemektedir. Bu süre hedefine göre, sistem problemlerin zorluk derecesini periyodik olarak ayarlar, bu sayede doğru çözümler ortalama on dakikada bir üretilebilir (Narayanan vd., 2016, s. 59).

Sınırsız işlem gücü veya sınırsız zamanı olmayan bir bilgisayarın tüm kopyaların yarısından çoğunu değiştirip (%51 saldırısı) zinciri yanıltmasının bugün için imkansız olduğu değerlendirilmektedir (Cryptech Kriptoloji Laboratuvarı, 2018, s. 5).

2.4.2 Pay İspatı(PoS)

Bir diğer mutabakat yaklaşımı Pay İspatı (PoS) yöntemidir. Bu yöntemde, kripto para sahipleri madencilik yapmak yerine, ortaya bir miktar para koyarak işlemlerin doğruluğu için rekabet ederler. Eğer ağın çoğunluğu blokları doğrularsa, doğrulayan taraf bir ödül kazanır. Ancak çoğunluk tarafından bloklar reddedilirse, ortaya konulan paralar imha edilmektedir. Bu mutabakat yönteminin iş ispatı yöntemine göre enerji tasarrufu açısından ciddi avantajları vardır. En çok işlem gören kripto paralardan biri olan Ethereum'da pay ispatı yöntemi kullanılmaktadır (Werbach, 2018, s. 67).

2.5 Dağıtık Defter Teknolojisi (Distrubuted Ledger Technology)

Dağıtık defter teknolojisi, birden çok veri deposunda (veya defterlerde) verilerin kaydedilmesi ve paylaşılması için yeni ve hızla gelişen bir yaklaşımı ifade eder. Bu teknoloji, işlemlerin ve verilerin farklı ağ katılımcılarından oluşan dağıtılmış bir ağ üzerinden kaydedilmesine, paylaşılmasına ve senkronize edilmesine olanak tanır. Tüm verilerin bir yerde tutulması zaman zaman bozulma, silinme, kayıp ve saldırıya uğrama gibi durumlara sebep olabilecekken, dağıtık kayıt sistemi bu sorunlara alternatif bir çözüm yolu üretmektedir (World Bank Group, 2017, s. VII).

Blok zincir, verileri bir ağ üzerinden değişmez bir şekilde kaydetmek ve senkronize etmek için kriptografik ve algoritmik yöntemler kullanan dağıtık kayıt uygulamasıdır. Ancak blok zinciri fiziksel olarak dağıtık olmasının yanı sıra mantıksal olarak merkezi bir kayıt işlevi görür ("Bitcoin: Clarifying the foundational innovation of the blockchain", 2014).

Dağıtık kayıt sistemlerinde tüm düğümler arasında tutarlılığı sağlamak için, depolanan verilerin dağıtılmış defterlerin her birinde aynı olması gerekir, bu da dağıtılmış veri tabanlarını genellikle merkezi veri tabanından daha karmaşık hale getirir. Tüm veriler tüm düğümler arasında aynıysa, dağıtılmış defterler tutarlı bir durumdadır ve tüm düğümler sonunda bu durum üzerinde anlaşmaya varmıştır ve dolayısıyla fikir birliğine varmıştır. Tutarlı bir duruma ulaşmak için saklanan veriler, dağıtılmış defterin düğümleri arasında

senkronize edilmelidir (Sunyaev, 2020, s. 266). Sonuç olarak, hiçbir yönetici ve hiyerarşik ilişki olmadan; her bir tam düğüm, blok zincirinin tam ve doğru bir kopyasına sahiptir ("invisible politics of bitcoin: Governance crisis of a decentralised infrastructure," 2016).

2.5.1 Dağıtık Kayıt Yapısı ve Güvenlik

Blok zincirinin dağıtık kayıt yapısı, dağıtık bir güven biçimi olarakta tanımlanabilir. Blok zinciri bir bütün olarak sisteme güveni ortaya koyar ("Ethereum Whitepaper," 2022). Sistemin herhangi bir bileşenine güvenmeden, yalnızca sistemin çıktısına güvenmek mutabakat yaklaşımları ile sağlanır. Bir mutabakat yaklaşımı olarak iş kanıtı, önceden tanımlanmış ancak isteğe bağlı bir koşulu karşılayan bir sayı dizisi üretilene kadar tek yönlü kriptografik karma algoritmaları tekrar tekrar çalıştırarak üretilir. İş kanıtı madencilik olarakta adlandırılabilir. Bu "iş kanıtı" bulmacasını çözmek, hesaplama açısından zor bir süreçtir ve herhangi bir kısayolu yoktur. Bu durum, ağdaki herhangi bir düğümde yer alan madencinin çok büyük miktarda maliyetli bilgi işlem kaynakları harcamadan gerekli çalışma kanıtını oluşturma şansının çok az olduğu anlamına gelir (World Bank Group, 2017, s. 6).

Dağıtılmış defterler, defterlere herhangi biri tarafından mı yoksa yalnızca ağdaki katılımcı düğümler tarafından mı erişilebileceğine bağlı olarak; genel (public) veya özel (private) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu ayrım bazı kaynaklarda da izinsiz (permissionless) ya da izinli (permissioned) olarak yapılabilmektedir. Tablo 2.1'de bazı dağıtılmış defter örnekleri, özellikleriyle birlikte yer almaktadır. Veri tabanlarının yoğun kullanıcıları olan finansal kurumlar, mevcut düzenleyici çerçevelere uymanın zorluğu nedeniyle şu ana kadar açık, izinsiz blok zincirlere fazla ilgi göstermemiştir. Ripple, Fabric ve Corda dağıtılmış defterleri bu duruma bir örnektir (World Bank Group, 2017, s. 13).

Tablo 2.1

Bazı DLT Örnekleri

Bitcoin	*•Açık/İzinsiz* *•İlk ve en büyük halka açık blok zinciridir.* *•Kripto para birimi Bitcoin işlemlerini kaydeder.*
Ethereum	*•Açık/İzinsiz* *•Akıllı sözleşmeler için en popüler blok zinciridir. Ethereum, akıllı sözleşmelerin oluşturulmasını sağlayan bir blok zincirinin üzerinde bir komut dosyası dilinin bulunmasına izin verir.*
Ripple	*• İzinli* *•Ticari, sınır ötesi ve bankalar arası ödemelere odaklanmıştır.* *•Bankacılık alternatifleri sunar.*
Fabric (Hyperledger Project)	*•İzinli* *•Açık kaynak kodludur.* *•Finansal uygulamalara odaklanmıştır.*
Corda (R3 CEV)	*•İzinli* *•70'in üzerinde finans kuruluşundan oluşan bir konsorsiyum olan R3 tarafından oluşturulmuştur.* *•Açık kaynak kodludur.* *•Finansal uygulamalara odaklanmıştır.*

Distributed Ledger Technology (DLT) and Blockchain. World Bank Group, 2017, s. 14

2.5.1.1 İzinsiz (Permissionless) Blok Zincir

Bitcoin, izinsiz blok zincirini tanımlayan en iyi örnektir. Kimin kullanabileceği konusunda herhangi bir engel teşkil etmemektedir. Herkes bir düğüm, madencilik yazılımı çalıştırabilir ve bir cüzdana erişebilir, blok zincirinin kurallarına uyduğu sürece işlemlere veri yazabilir. Bu blok zinciri türleri açık ve şeffaftır, herkes istediği zaman inceleyebilir

(Dattani & Sheth, 2014, s. 1). Bir P2P ağındaki her düğüm, tüm defterin tam ve güncel bir kopyasına sahiptir. Deftere önerilen her lokal ekleme, bir ağ katılımcısı, ağ üzerinden tüm düğümlere iletilir. Düğümler, değişikliği algoritmik bir fikir birliği mekanizması aracılığıyla toplu olarak doğrular. Doğrulama kabul edildikten sonra, tüm ağda veri tutarlılığını sağlamak için ilgili tüm defterlere yeni kayıtlar eklenir (World Bank Group, 2017, s. 19).

2.5.1.2 İzinli (Permissioned) Blok Zincir

Özel ya da izinli dağıtık defterler ise insanların blok zinciri ağına kolayca katılamadığı, geçmişi göremediği veya söz konusu görevi yapmak için bir tür izne ihtiyaç duydukları kapalı bir ekosistem gibi davranırlar. Özel kişi veya izinlerle ilgilenen merkezi bir otoritenin bulunduğu bir kuruluşa aittir. Mutabakat mekanizması, izinsiz veya genel blok zinciri ile aynı olabilir veya başka bir şey kullanılabilir (Dattani & Sheth, 2014, s. 1). İzin verilen bir sistemde, düğümlerin ağa erişmek ve defterde değişiklik yapmak için merkezi bir varlıktan izin alması gerekir. Erişim kontrolleri, kimlik doğrulamasını içerebilir (World Bank Group, 2017, s. 19).

2.5.1.3 İzinli ve İzinsiz Dağıtık Defterler Arasındaki Benzerlik ve Farklılıklar

İzinli ve izinsiz dağıtık defterler arasında aşağıda sıralanan benzerlikler bulunmaktadır:

1.Her ikisi de, eşler arası ağ aracılığıyla dağıtılan, değiştirilemez, dijital olarak imzalanmış defterlerdir.

2.Her ikisi de mutabakat adı verilen bir protokol aracılığıyla güncellenen defterleri tutar.

3.Her ikisi de değişmez bir defter tuttuğunu iddia etmektedir.

Farklılıklar ise; ağa katılma, fikir birliği mekanizmasını yürütme ve paylaşılan deftere erişim iznine sahip olma durumlarından kaynaklanır. İzinsiz bir blok zinciri, tüm katılımcılara ağa katılmaları için açık davet sunar. Ağ temel olarak 'çalışma kanıtı' teşvik mekanizmasıyla çalıştırılır. İzinsiz blok zincirinin dezavantajlarından biri, fikir birliğine varmak için ağdaki her düğümün karmaşık bir bulmacayı çözmesi gerektiğidir. Bu kadar çok düğümün çalışması için, dünyanın ekosistemini etkileyen çok fazla enerji kullanılır. Diğer bir dezavantaj ise bilgi herkese açık olduğu için halka açık blok zincirinde mahremiyet

olmaması durumudur ("Permissionless blockchain vs Permissioned blockchain - What's your pick?," 2021).

2.6 Blok Zincir Teknolojisine Bütüncül Bir Bakış

Blok zincir; Temmuz 2008'de Satoshi Nakamoto takma isimli birinin bir tartışma grubuna gönderdiği "Bitcoin: Eşten Eşe Elektronik Ödeme Sistemi" isimli bir makaleden yola çıkılarak üretilen Bitcoin'in temel yeniliği olarakta bilinmektedir. Dağıtılmış defter, bir ağın üyeleri arasında paylaşılan, çoğaltılan ve senkronize edilen bir tür veri tabanı veya kayıt sistemidir. Blok zinciri ise blok adı verilen paketlerde; değiştirilemez, dijital olarak kaydedilmiş verilerden oluşan ve her bloğun daha sonra bir kriptografik imza kullanılarak bir sonraki bloğa "zincirlendiği" bir dağıtılmış defter türüdür (Food and Agriculture Organization of the United Nations & International Telecommunication Union, 2019, s. 11).

Blok zincirinin ana amacının dağıtılmış sistemlerde bütünlüğün korunması olduğu ileri sürülmektedir. Yazılım sistemleri bağlamında bütünlük ise, bir sistemin güvenli, eksiksiz, tutarlı, doğru, bozulma ve hatalardan arınmış olması için işlevsel olmayan bir yönüdür. Blok zinciri tarafından çözülmesi gereken temel sorun, güvenilirliği bilinmeyen, bilinmeyen sayıda eşten oluşan ve tamamen dağıtılmış bir eşler arası sistemde, bütünlüğü ve güvenilirliği sağlamak ve sürdürmektir. Bu sorun aslında bilgisayar bilimlerinde iyi bilinen ve yaygın olarak tartışılan bir problemdir. Ordudan bir metafor kullanılarak, "Bizans Generalleri Problemi" olarak adlandırılmıştır (Drescher, 2017, s. 31).

Blok zincir birbirinden farklı olarak;

-Bir veri yapısı,

-Bir algoritma adı,

-Bir dizi teknoloji için isim,

-Ortak kullanım alanına sahip eşler arası dağıtılmış sistemler için bir terim olarak tanımlanabilmektedir (Drescher, 2017, s. 33).

Bilgisayar bilimi ve yazılım mühendisliğinde veri yapısı, somut bilgi içeriğinden bağımsız olarak verileri düzenlemenin bir yoludur. Bir veri yapısı, mimaride bir bina için kat planı olarak düşünülebilir. Bir bina için kat planı, beton kullanımı ne olursa olsun, alanı duvarlar, zeminler ve merdivenlerle ayırmayı ve birleştirmeyi ele alır. Bir veri yapısı için bir isim olarak kullanıldığında, blok zinciri, blok adı verilen birimlerde bir araya getirilen

verileri ifade eder. Bu bloklar birbirine bir zincir gibi bağlanır, dolayısıyla blok zinciri adı verilir (Drescher, 2017, s. 34).

Yazılım mühendisliğinde, algoritma terimi, bir bilgisayar tarafından tamamlanacak bir dizi talimat anlamına gelmektedir. Bu talimatlar genellikle veri yapılarını içerir. Bir algoritma için bir isim olarak kullanıldığında, blok zinciri, demokratik bir oylama şemasına benzer şekilde, tamamen dağıtılmış bir eşler arası sistemde birçok blok zinciri veri yapısının bilgi içeriğini müzakere eden bir talimat dizisini ifade eder (Drescher, 2017, s. 34).

Bir teknoloji paketine atıfta bulunmak için kullanıldığında, blok zinciri, veri yapısının, blok zinciri algoritmasının ve ayrıca tamamen dağıtılmış eşler arası bütünlük elde etmek için kullanılabilen kriptografik ve güvenlik teknolojilerinin bir kombinasyonunu ifade eder (Drescher, 2017, s. 36). Blok zinciri, blok zinciri teknolojisi paketini kullanan tamamen dağıtılmış eşler arası defter sistemleri için terim olarak da kullanılabilir. Bu bağlamda blok zincir, tamamen dağıtılmış bir sistemin parçası olan bir yazılım birimine atıfta bulunmak yerine, bir bütün olarak tamamen dağıtılmış bir sistemi ifade eder (Drescher, 2017, s. 37).

Blok zincir teknolojisi iş süreçlerinde kullanılmak üzere aracısız bir güven sistemi oluşturmayı hedeflemektedir. “Aynı gerçeğe tanıklık eden bağımsız tanıklar ne kadar fazlaysa, bu gerçeğin gerçekten doğru olma şansı o kadar yüksek olur.” fikri blok zincirinin temel yol haritalarından biri olarak ileri sürülmektedir (Drescher, 2017, s. 40). Sahiplik durumunu bir defter ile yönetmek ve blok zinciri arasındaki ilişki şu şekilde özetlenebilir:

• Sahiplikle ilgili verileri depolayan bir blok zinciri veri yapısına eşdeğer olan, sahiplik hakkındaki bilgileri korumak için bireysel bir defter kullanılır.

• Bireysel defterler, eşler arası bir sistemin bilgisayarlarında (düğümlerinde) depolanır.

• Blok zinciri algoritması, bireysel düğümlerin toplu olarak nihai kararın dayandığı sahiplik durumunun tutarlı bir versiyonuna ulaşmasına izin vermekten sorumludur.

• Bu sistemdeki bütünlük, mülkiyet hakkında doğru açıklamalar yapabilme yeteneğidir.

• Güvenilir bir tanımlama, kimlik doğrulama, yetkilendirme aracı oluşturmak ve veri güvenliğini sağlamak için kriptografi gereklidir (Drescher, 2017, s. 46).

2.6.1 Blok Zincir Teknolojisinin Temel Özellikleri

Blok zincir tabanlı dağıtık defter sistemlerinin beş temel karakteristik özelliği bulunmaktadır. Aşağıda yer alan başlıklarda, bu özellikler incelenmiştir.

2.6.1.1 Ademi Merkeziyetçilik

Blok zincir, dijital imzalar, kriptografik hash ve dağıtılmış konsensüs algoritmaları gibi birkaç temel teknolojiyi içeren merkezi olmayan bir ortamda çalışır. Tüm işlemler, herhangi bir aracının işlemleri doğrulaması gerekliliğini ortadan kaldıran merkezi olmayan bir şekilde gerçekleşir (Litke vd., 2019, s. 1). Bu durum, sunucu maliyetlerini (geliştirme maliyeti ve işletme maliyeti dahil) ve merkezi sunucudaki performans darboğazlarını azaltabilir (Monrat vd., 2019, s. 5).

2.6.1.2 Şeffaflık

Bir blok zinciri ağında meydana gelen tüm işlemler, dijital dağıtılmış bir defter tarafından kaydedilir ve dijital bir zaman damgası ile doğrulanır. Sonuç olarak, ağdaki herhangi bir düğüme erişerek önceki kayıtları denetlemek ve izlemek mümkündür (Yu vd., 2019, s. 5). Örneğin, Bitcoin için gerçekleşen tüm işlemler, blok zincirinde yinelemeli olarak izlenebilir. Bununla birlikte, paranın sürekli olarak birçok hesapta yer değiştirmesi, parayı kaynağına kadar takip etmeyi çok zor hale getirmektedir.

2.6.1.3 Değişmezlik

Blok zinciri veri yapısının değişmezliği, hash bulmacasının neden olduğu hesaplama maliyetlerine bağlıdır. Hash bulmacalarının zorluğu, ne kadar hesaplama çabası gerektiği ve dolayısıyla onları çözmek için ne kadar zamana ihtiyaç olduğunu belirler, bu da blok zinciri veri yapısının değişmezliğini belirler. Zorluk çok yüksekse, yeni bir blok eklemenin hesaplama maliyetleri yükselmekte, bu da düğümleri yeni işlem verileri eklemekten caydırmaktadır. Bu nedenle, bir blok zinciri tasarlamadaki zorluk, hash bulmacaları için uygun zorluk seviyesini belirlemektir. (Wood, t.y., s. 7)

Gerçek dünyadaki blok zinciri uygulamaları, tüm bloklar için nadiren sabit bir zorluk seviyesi kullanır. Bunun yerine tipik olarak yeni blokların eklenme hızına bağlı olarak

dinamik bir zorluk seviyesi kullanılır. Bu, hash bulmacasını çözmek için gereken sürenin, gerçek hesaplama çabası artabilirken, düğümlerin işlem verilerinin geçmişini manipüle etmesini önleyen bir seviyede kalmasını sağlamaktadır (Wood, t.y., s. 6).

2.6.1.4 Erişilebilirlik

Kuruluşlar, müşterilerine ürün ve hizmetler sunmak için verilere güvenirler. Verilerini "canlı" veya "çevrimiçi" tutmak için kuruluşların, ağda bir kesinti olması durumunda bile bilgi teknolojisi altyapısını aktif tutması gerekmektedir. Verilere bu garantili erişim durumu, veri erişilebilirliği olarak bilinir. Verilere erişilemeyen bir senaryo, hizmetlerin sunulmasını engelleyebileceği ve bazı durumlarda diğer verileri de tehlikeye atan bir zincirleme reaksiyon oluşturabileceği için oldukça sorunlu olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle kuruluşlar, görev açısından kritik verilerin her zaman erişilebilir kalmasını sağlamak için önlemler almalıdır ("Ensuring the continued functioning of business operations," 2022).

Kuruluşlar, önemli verileri kullanılabilir durumda tutmalı ve veri kesinti sürelerini mümkün olduğunca kısaltmalıdır. Veri kullanılabilirliğini sağlamak için kuruluşların tüm donanım arızalarını hızla onarabilmeleri ve yedekleri koruyabilmeleri gerekmektedir ("Ensuring the continued functioning of business operations," 2022). Merkezi olmayan bir yapıya sahip olan blok zinciri ağı, ağı işletmek için birçok düğüm içermektedir. Her düğümde defterin bir kopyası bulunur ve ağa katılan yeni düğümler de bunun bir kopyasını içerecektir. Bu nedenle, blok zincir ağı oldukça esnektir. Bir düğüm devreden çıkarsa veya ağdan ayrılırsa, ağın kararlılığını korumak için yeni düğümler katılabilmektedir (Hoang vd., 2019, s. 199). Bu durum, ağa erişilebilirlik anlamında ciddi faydalar sağlamaktadır.

2.6.1.5 Güvenlik

Blok zinciri, tanımlama, kullanıcıların kimlik doğrulaması ve işlemlere yetki verilmesi için asimetrik kriptografi kullanmaktadır. Blok zincirindeki hesap numaraları aslında halka açık şifreleme anahtarlarıdır. Yalnızca ilgili özel anahtara sahip olan kişi, bir hesapla ilişkili mülke erişebilmektedir. Yalnızca ilgili özel anahtarla oluşturulmuş bir dijital imza içeren işlem verileri geçerlidir ve mülkü bir hesaptan diğerine aktarabilir. Blok

zincirinde özel anahtar, yasal sahibine yetki veren tek güvenlik aracı olarak değerlendirilmektedir. Bir hesabın özel anahtarının, bilerek, yanlışlıkla veya veri hırsızlığı nedeniyle bir başkasına verilmesi durumunda, o bireysel hesabın güvenliği bozulmaktadır (Drescher, 2017, s. 206).

Bir hesap numarasıyla ilişkilendirilen mülkü koruyan ek güvenlik önlemleri yoktur. Blok zincirinde kullanılan asimetrik kriptografinin mevcut en iyi ve en güçlü kriptografik yöntemlerden biri olarak kabul edildiğini belirtmek önemlidir. Bu nedenle, blok zincirinin güvenlik konseptinde kendi başına herhangi bir başarısızlık veya kusur olmadığı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, blok zinciri kullanıcılarını özel anahtarlarını kaybetmekten veya istemeyerek başkalarıyla paylaşmaktan korumak için ek bir güvenlik ağı yoktur. Bu, güvenlik anahtarlarının gerçek hayatta evleri veya arabaları korumak için kullanılması ya da kredi veya banka kartlarını güvence altına almak için PIN numaralarının kullanılmasına benzetilmektedir. Anahtar tanımlanan kullanıcısı dışında başka birine verildiğinde, bunun nedeni ne olursa olsun, güvenlik bozulur ve PIN'i veya anahtarı olan herkes anahtarın getirilerinden faydalanabilmektedir. Bir blok zinciri hesabının özel anahtarı bunun bir istisnası değildir. Bununla birlikte, bazı insanlar ek güvenlik önlemlerinin eksikliğini blok zincirinin kullanımı için sınırlayıcı bir faktör olarak görmektedir (Drescher, 2017, s. 207).

2.6.2 Blok Zincir Teknolojisinin Sınırlamaları

Blok zinciri teknolojisi, geleneksel merkezi mimarilere kıyasla bir dizi farklı fayda sunma potansiyeline sahip olmakla beraber, bir takım sınırlamalar da sergilemektedir (Hughes vd., 2019, s. 121). Bahsedilen bu sınırlılıklar aşağıda sekiz başlık altında toplanmıştır.

2.6.2.1 Gizlilik Eksikliği

Blok zinciri, işlem verilerinin tüm geçmişini koruyan tamamen dağıtılmış bir eşler arası defterdir. İzinsiz blok zincirinde mallar ve transfer edilen miktar, ilgili hesaplar ve transfer zamanı gibi tüm işlem detaylarına herkes erişebilir (Nakamoto, 2008, s. 1). Ağdaki her düğüm, ağ işlem verilerinin tam geçmişini tutar. Bu, belirli uygulamalar için bir nitelik

ve güvenlik bağlamında bir avantaj olabilir, ancak gizliliğin bir zorunluluk olduğu kullanım durumları için bir sınırlama olabilir (Drescher, 2017, s. 206).

2.6.2.2 Yüksek Maliyet

Tüm işlem geçmişinin tüm düğümler arasında çoğaltıldığı blok zincir teknolojisi düğümler arasında tutarlılığı hash fonksiyonları ve mutabakat algoritmaları ile sağlamaktadır. Hash fonksiyonunu çözmek veya işin kanıtını sağlamak, işlem verilerinin geçmişini değişmez kılan bir güvenlik önlemi almak adına, hesaplama açısından pahalıdır. Hesaplama maliyetleri; hesaplama döngülerinin sayısı, fiziksel zaman, elektrik enerjisi ve para gibi çeşitli ölçeklerde ifade edilebilir. Bu özniteliğin güvenlik avantajları vardır, ancak daha büyük ağlar için bir sınırlama olabilir (Drescher, 2017, s. 207).

2.6.2.3 Güvenlik Modeli

Blok zinciri, tanımlama, kullanıcıların kimlik doğrulaması ve işlemlere yetki verilmesi için asimetrik kriptografi kullanmaktadır. Blok zincirindeki hesap numaraları aslında halka açık şifreleme anahtarlarıdır. Bu işlem çok güvenli olmasına rağmen, bir genel ve bir özel anahtarın kullanılmasını gerektirmektedir. Bir tarafın özel anahtarını kaybetmesi veya istemeden yayınlaması durumunda, sistemin ek güvenlik sağlayacak bir güvenlik mekanizması yoktur. Bahsedilen ek güvenlik önlemlerinin eksikliği blok zincirinin kullanımı için sınırlayıcı bir faktör olarak görülmektedir (Drescher, 2017, s. 206).

2.6.2.4 Esneklik Sınırlamaları

Blok zinciri, optimize edilmiş ve birbirine uyarlanmış çeşitli kavram ve protokollerden oluşan karmaşık bir teknik yapıdır. Bu ince ayarlı ekosistemi değiştirmek çok zor olabilir. Bir blok zincirinin ana bileşenlerinin çalışmaya başladıktan sonra nasıl değiştirileceği veya yükseltileceği konusunda yerleşik bir prosedür oluşturulmamıştır. Bu, blok zincirini oluşturan teknolojiler için dolaylı olarak uzun bir hizmet ömrü oluşturur. Örneğin, kriptografik prosedürler, potansiyel olarak yüzyıllar olan blok zincirinin ömrü boyunca geçerli olmalıdır. Ayrıca blok zincirinde hataları düzeltmenin veya protokol ayarlamaları yapmanın zor olması, blok zincirde geliştirme yapan insanlar için

değişmezliğin neden olduğu bir sorun olarak değerlendirilmektedir. Bu özellikler, tüm blok zinciri teknolojisi paketini diğer teknolojilerden daha az esnek hale getirmektedir (Drescher, 2017, s. 208).

2.6.2.5 Yönetim ve Gizli Merkeziyetçilik

Blok zinciri veri yapısına eklenen her blok için bir hash bulmacası çözme gerekliliği ve sistemin bütünlüğüne katkı sağlayan ödüllerin dağıtılmasına ilişkin kurallar, madenciler arasında rekabete neden olmaktadır. Gerekli finansal kaynaklara sahip olanlar, hash bulmacasını çözmeyi ve dolayısıyla sisteme katkıda bulunmayı karlı hale getiren özel donanımlara yatırım yapmaktadırlar (Bedford Taylor, 2013, s. 5-8).

Öte yandan, sisteme yeni işlem verilerinin doğrulanması ve eklenmesi girişimi, yeterli donanıma erişimi olmayanlar için kârsız hale gelir. Bu durum, hesaplama gücü az olanların sisteme katkıda bulunan hesaplama kaynaklarından çekilmelerine neden olur. Sonuç olarak, toplu olarak sistemin bütünlüğünü koruyan sözde büyük ve çeşitli eşler grubu, sonunda her biri özel donanım biçiminde büyük hesaplama gücüne sahip olan çok küçük bir varlık grubu haline gelebilmektedir. Bu da dolaylı olarak ağda merkezileşmeye neden olur. Kalan akran grubu, sistemin bütünlüğünü koruma sorumluluğunu kendi aralarında bölen bir oligopol oluşturur. Diğer sektörlerdeki oligopollere benzer şekilde, bu küçük varlık grubu gücünü kötüye kullanabilir (örneğin, belirli işlemleri atlayarak veya belirli kullanıcıları ayırt ederek). Bu etki, tüm sistemin dağıtılmış doğasını baltalayan bir tür gizli merkezilik kurabilir (Kroll vd., 2013, s. 11-14). Teknik açıdan, böyle bir sistem hala dağıtık bir sistemdir, ancak bütünlüğü yalnızca az sayıda varlık tarafından sağlanan bir sistemdir. Blok zinciri mimarisinin dağıtık yapısı, belirli kullanım durumları için belirgin avantajlar sunar, ancak gözetime dayalı kuruluşlar tarafından genel kontrol ve yönetişim için önemli bir sınırlamaya sebep olabilir (Drescher, 2017, s. 208).

2.6.2.6 Kritik Boyut

Manipülasyonlara karşı sağlamlık ve dolayısıyla toplu olarak tutulan işlem verilerinin güvenilirliği, sistemin hesaplama gücünün çoğunluğunun dürüst düğümler tarafından kontrol edildiği varsayımına dayanmaktadır. Bununla birlikte, sınırlı bir hesaplama gücüne sahip küçük eşler arası sistemlerde, dürüst olarak varsayılan düğümler

hala çok küçük olabilir ve bu da yüzde 51'lik bir saldırı gerçekleştirmeyi mümkün kılabilir. Bu sorun, özellikle düşük piyasa değeri ve sınırlı kullanıcı kabulü olan kripto para birimleri için geçerlidir. Bu nedenle, herhangi bir blok zinciri, onu desteklemek ve onu çok fazla hesaplama gücüne sahip saldırganlara karşı dirençli kılmak için kritik bir dürüst düğüm kütlesi gerektirecektir. Yüzde 51 saldırılarını imkansız kılan kritik bir boyuta ulaşmak, her yeni blok zincirinin yüzleşmesi gereken bir zorluk olarak değerlendirilmektedir (Drescher, 2017, s. 209).

2.6.2.7 Yasal Kabul Eksikliği

Blok zinciri, kullanıcılarına açık ve tamamen dağıtılmış bir eşler arası sistemde yönetme ve mülkiyeti devretme imkanı sunan bir teknolojidir. Bağımsız meslektaşların, dağıtılmış bir fikir birliği yoluyla mülkiyeti toplu olarak yönetme şekli, blok zincirinde yapılan ve yönetilen işlemlerin yasal sonuçlarıyla ilgili soruları gündeme getirmiştir. Blok zincirinde gerçekleştirilen işlemlerin yasal sonuçları ve kabulü ile ilgili soruların, teknolojisinin güvenliği ve karmaşıklığından bağımsız olarak tartışılması gerekmektedir. Bu, kurulu hukuk sistemine yeni bir mülkiyet yönetimi yaklaşımının dahil edilmesiyle ilgili bir sorundur. İnternetin ortaya çıkışına ve gelişimine tanık olanlar tarafından, günümüzde blok zincirinin yasal statüleri ile 1990'larda internet ticaretinin yasal olarak kabul edilmemesi benzer olarak değerlendirilmektedir (Drescher, 2017, s. 209).

2.6.2.8 Kullanıcı Kabulü Eksikliği

Kullanıcı kabulü veya eksikliği, hafife alınamayacak başka bir sınırlama olarak gözükmektedir. Blok zincirinin net bir yasal statüsünün olmayışı, kullanıcıları arasında belirsizliğe neden olacak ve bu da onu kullanmaya olan ilgilerini azaltacaktır. Kullanıcı kabulünün ek bir yönü; bilgi ve eğitim olarak karşımıza çıkmaktadır. Temel işleyişi anlaşılmadığında müşterilerin blok zincirini kullanmasını ve güvenmesini beklemek gerçekçi değildir (Drescher, 2017, s. 210).

2.7 Blok Zincir Teknolojisinden Etkilenebilecek İş Alanları

Blok zincir, hem akademi hem de iş organizasyonlarında giderek artan bir yayılıma sahip, gelişmekte olan bir teknolojidir. Blok zinciri teknolojisinin ilk uygulaması, ağ kullanıcılarının yalnızca bilgisayarlarında bulunan sanal para ile hızlı ve güvenli bir şekilde işlem yapmalarını sağlayan bir protokole dayalı dijital para birimi olan Bitcoin olmuştur. Bitcoin blok zinciri, şimdiye kadar gerçekleştirilmiş tüm Bitcoin işlemlerinin halka açık bir defteridir. Bu yönüyle konvansiyonel bankacılığa benzetilebilmekte olup, blok zinciri, bankacılık işlemlerinin tam bir geçmişi gibidir. Bloklar, bireysel banka hesap özetleri gibidir. Blok zinciri, on binlerce bilgisayardan oluşan küresel bir ağ tarafından sağlanan kriptografi ve bol bilgi işlem gücü yardımıyla güncel tutulmaktadır ("Further applications of the blockchain," 2014, s. 1).

Blok zincir teknolojisi, geleneksel ödeme sistemlerini geliştirmenin veya onların yerini almanın güçlü bir yolu olarak değerlendirilmektedir. Aracısız ve ulusötesi yapıları ve değer aktarma yetenekleri nedeniyle blok zincirler, coğrafi sınır tanımayan ve merkezi bir otoriteye ihtiyaç duymadan birkaç dakika içinde dünya çapında gönderilebilen yeni nesil dijital para birimlerini desteklemektedir. Bu dijital para birimlerinin, gelişmiş havale sistemlerinin ve diğer uluslararası değer transferi biçimlerinin ortaya çıkmasını kolaylaştırarak istikrarlı ödeme sistemlerinden yoksun ülkelere yardımcı olabileceği değerlendirilmektedir (Filippi, 2018, s. 61).

Yapılan araştırmalara göre blok zincir teknolojisinin henüz keşfedilmemiş olduğu ve birçok alanda sunabileceği çok şey olduğu ileri sürülmektedir. Blok zincir teknolojisinin daha geniş bankacılık, dijital oylama ve uluslararası ticarete kadar uzanan potansiyel uygulamaları ile gelecekte daha çok yer alacağı değerlendirilmektedir (Ünal & Kocaoğlu, 2018, s. 54). Blok zincirin potansiyel kullanım alanlarına çeşitli örnekler verilebilir:

Dijital hükümet bağlamında, blok zincir teknolojisi, kamu kurumları, vatandaşlar ve ekonomik aktörler arasında doğrudan etkileşimleri kolaylaştırma potansiyeline sahiptir. En temel düzeyde bu, bilgi kaydı ve değişim süreçlerinde kamu hizmetlerinin iyileştirilmesi anlamına gelir. Blok zincir teknolojisi, yeni bir merkezi olmayan bilgi altyapısı oluşturan mevcut ancak uzak birkaç teknolojinin birleşimidir. Blok zincirlerin yerelleştirilmesi, devletlerin vatandaşlarla ve birbirleriyle etkileşim şeklini yeniden yapılandırabilecek bir özelliktir (Atzori, 2015, s. 46).

Blok zincir teknolojisi, günümüzde kamu kurumları vasıtasıyla toplumda yerine getirilen idari görevlerin büyük bir bölümünü kolaylaştırabilir. Örneğin kamu kurumları,

toplumlardaki ekonomik faaliyetleri kolaylaştırmak için kendi başlarına bilgi depolama ve bilgi alışverişi süreçlerini sağlamak yerine blok zinciri protokolünü kullanabilir. Bu noktada, bu altyapıda gerçekleşen işlemlerde denetleyici bir rol üstlenmelidirler (Allessie vd., 2019, s. 11).

6112 sayılı Kanununun "Kuruluş" başlıklı 34'üncü maddesinde "(1) Radyo, televizyon ve isteğe bağlı yayın hizmetleri sektörünü düzenlemek ve denetlemek amacıyla, idarî ve malî özerkliğe sahip, tarafsız bir kamu tüzel kişiliği niteliğinde Radyo ve Televizyon Üst Kurulu kurulmuştur." hükmü yer almaktadır. Ayrıca, Elektronik Haberleşme Kanununun 36'ncı maddesi kapsamında RTÜK'e tahsis edilen yayıncılık spektrumunun yönetimine ilişkin olarak 6112 sayılı Kanun ile televizyon kanal ve radyo frekans planlama yetkisi RTÜK'e verilmiştir. Bu kapsamda frekans spektrumunda yer alan 87.5-108.0 MHz frekans aralıkları FM analog radyo, VHF III (174-230 MHz) karasal sayısal radyo (T-DAB ve DVB-T) ve VHF III (174-216 MHz) ve UHF IV/V (470-694 MHz) bantları karasal sayısal televizyon yayınları (DVB-T2) için olmak üzere RTÜK iznine tabidir (BTK, 2019).

ITU Bölge 1'de 470-862 MHz'deki UHF bandı tarihsel olarak analog televizyona tahsis edilmiştir ancak WRC-07'de 790-862 MHz'deki UHF bandının üst kısmı 2015'ten itibaren olmak üzere, Bölge 1'de mobil servislerin kullanımına açılmıştır (ITU, 2010, s. 30). WRC-12'de ise ITU Bölge-1'de 694-790 MHz (700 MHz) frekans bandı Çözüm Kararı 760'ta belirtilen hükümlere uymak şartı ile hava mobil hariç mobil servisler için tahsis edilmiştir.

WRC-19 Konferansında, 2023 yılında düzenlenecek olan WRC-23 ülkemizin de içinde bulunduğu Bölge-1 (Region-1) için WRC-15'te alınan Çözüm Kararı 235 kapsamında 470-694 MHz bandına ilişkin olası düzenleyici önlemlerin de dikkate alınması suretiyle, 470-960 MHz bandındaki servislerin mevcut spektrum kullanımlarının ve spektrum ihtiyaçlarının incelenmesine karar verilmiştir. Ülkemizde hâlihazırda analog karasal televizyon yayıncılığı için kullanılmakla birlikte sayısal karasal televizyon yayıncılığında da kullanılacak olan 470-694 MHz frekans bandının da içinde yer aldığı 470-960 MHz frekans bandı ile ilgili olarak alınacak kararlar, karasal televizyon yayıncılığı için büyük önem taşımaktadır.

2023 yılında gerçekleştirilecek Dünya Radyokomünikasyon Konferansında Gündem Maddesi 1.5'te ülkemizde karasal yayıncılık için kullanılan 470-694 MHz bandına ilişkin hususlar görüşülecektir. Bilindiği üzere WRC-2019 ile birlikte hâlihazırda karasal televizyon yayıncılığında kullanılmakta olan 470-694 MHz frekans aralığının IMT servisi

için değerlendirilmesi hususu bir sonraki toplantı olan WRC-2023'ün gündem maddeleri arasına girmiştir.

Bu tezin Spektrum Yönetiminin Amaç ve Hedefleri Başlıklı birinci bölümününün 1.5 Sayısal Pay (Digital Dividend) alt başlığında yer alan sayısal pay, karasal televizyon yayınlarının analogdan sayısala geçişiyle serbest kalan spektrum miktarı, yani VHF ve UHF bantlarındaki mevcut analog televizyon hizmetlerini sayısal biçimde barındırmak için nominal olarak gerekli olanın üzerindeki spektrum miktarı, olarak tanımlanmaktadır. Bu hususta WRC toplantılarında alınan son kararlardan görülebileceği üzere RTÜK iznine tabi olan spektrumun bir kısmı, sayısal yayıncılığa geçildiği varsayılarak farklı hizmetlere tahsis edilmektedir.

Sayısal pay spektrumunun açılabileceği yenilikçi kullanım yelpazesi geniştir ve gelecekte daha da büyüyebileceği düşünülmektedir. OFCOM'a (2007) göre, ICT sektörünü karakterize eden hızlı değişimler göz önüne alındığında, yeni teknolojiler ve hizmetler ile mevcut teknolojiler için yeni kullanımlar ortaya çıkabilir ve bu da sayısal pay spektrumunun kullanılmasını gerektirebilir (s. 30). Tezin 3.bölümünde karasal televizyon yayıncılığının geleceği adına, halihazırda RTÜK iznine tabi spektrumun yayıncılık ve potansiyel diğer hizmetlerin ortak kullanımına sunulması maksadıyla, spektrum paylaşımlarına dair modern yaklaşımlar incelenecektir. Bu hususta dağıtık defter teknolojisi (DLT) ve blok zincir yaklaşımları ön plana çıkmaktadır.

BÖLÜM 3

3.KARASAL YAYINCILIK BANDI SPEKTRUM PAYLAŞIMINDA BLOKZİNCİR YAKLAŞIMLARI

Bu bölümde RTÜK iznine tabi spektrumun yayıncılık ve potansiyel diğer hizmetlerin ortak kullanımına sunulması maksadıyla, spektrum paylaşımlarına dair modern yaklaşımlar blok zincir bakış açısıyla incelenecektir. Bu hususta öncelikle modern spektrum paylaşımı yaklaşımları değerlendirilmiş, devamında bu yaklaşımların düzenleyici bakış açısıyla nasıl incelenmesi gerektiğine dair ışık tutulmuştur. Son olarak spektrum paylaşımı yaklaşımlarına blok zincir teknolojisinin olası faydaları ve sınırlılıkları değerlendirilmiştir.

3.1 Spektrum Yönetimine Dair Modern Yaklaşımlar

Bilindiği üzere radyo spektrumu, bilgiyi iletmek için kullanılan belirli bir elektromanyetik enerji frekans aralığını ifade etmektedir. Radyo spektrumunun tahsisi ve yönetimi, ulusal düzenleyici otoriteler tarafından yönetilmektedir. Bu makamlar, uluslararası politika girişimleri tarafından oluşturulan uyumlu bir çerçeve içinde birlikte çalışmaktadır. Radyo ve televizyon yayıncılığı, sivil havacılık, uydular, savunma ve acil servisler gibi toplum için önemli olan uygulamalar, belirli radyo frekansı tahsislerine bağlıdır. Ancak son zamanlarda, internet üzerinden iletilen artan miktarda veri, akıllı telefonlar, tabletler, Wi-Fi ağları ve internete bağlı günlük nesneler dahil olmak üzere hızla artan sayıda kablosuz cihaz nedeniyle spektrum talebinin çarpıcı bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir (Zamblé vd., 2016, s. 4125).

Radyo spektrumunun geniş bir bölümünün mevcut kablosuz ağlar tarafından dolu olduğu göz önünde bulundurulduğunda, tüm yeni kablosuz ağlar için yeterli spektrumun mevcut olmadığı gerçeği ortaya çıkmaktadır. Aslında, radyo spektrumunun doğal ve genişletilemez karakteri, onu az miktarda kullanılması gereken nadir bir meta haline getirmektedir. Yapılan çalışmalar ile düzenleyici kurumlar tarafından yönetilen spektral kaynağın; neredeyse tamamen dolu olduğu ve verimli bir şekilde kullanılmadığı görülmektedir (Kaur vd., 2012, s. 51).

İngiltere İletişim Ofisi (OFCOM) tarafından paylaşılan bir çalışmaya göre, resmi olarak atandıkları gün itibariyle birçok frekansın boş olduğu kaydedilmiştir (Guide to the

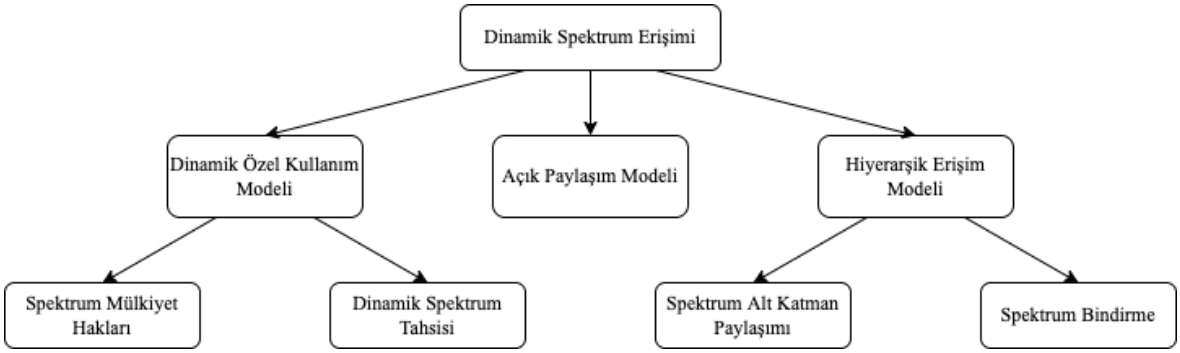
Spectrum Framework Review, 2005, s. 14). Buradan hareketle geleneksel spektrum yönetiminin, fiili olarak etkin bir kullanıma izin vermediği yorumu yapılabilmektedir. Bu durum politika yapıcı ve düzenleyicilerin dikkatini spektrumun daha verimli kullanımını sağlamak amaçlı, hizmetlerin ve yenilikçi teknolojilerin iyileştirilmesine yol açan istikrarlı esneklik ve maliyetler dengesine daha fazla vurgu yapan spektrum düzenlemesi yaklaşımlarına çekmektedir (Zamblé vd., 2016, s. 4125). Bu nedenle tezin devamında ortaya çıkan bu yeni yaklaşımlar incelenmiştir.

3.1.1 Dinamik Spektrum Erişimi

Mevcut statik spektrum yönetimi politikasının tersini temsil eden dinamik spektrum erişimi terimi, spektrum reformuna yönelik çeşitli yaklaşımları kapsayan geniş çağrışımlara sahiptir (Zhao & Sadler, 2007, s. 80). Şekil 3.1'de görüldüğü üzere dinamik spektrum erişim stratejileri genel olarak üç model altında kategorize edilebilmektedir.

Şekil 3.1

Dinamik Spektrum Erişim Stratejileri A Survey of Dynamic Spectrum Access. Zhao & Sadler, 2007, s. 80



Dinamik özel kullanım modeli, mevcut geleneksel spektrum düzenleme politikasının temel yapısını koruyarak yeni bir yaklaşım öne sürmektedir. Spektrum bantları, özel kullanım için hizmetlere lisanslanmıştır. Ana fikir, spektrum verimliliğini arttırmak için esneklik sağlamaktır. Bu model altında spektrum mülkiyet hakları ve dinamik spektrum tahsisi olmak üzere iki yaklaşım önerilmiştir. Spektrum mülkiyet hakları yaklaşımı, lisans

sahiplerinin spektrum üzerinde ticaret yapmalarına ve teknolojiyi özgürce seçmelerine olanak tanır. Böylece ekonomi ve piyasa, bu sınırlı kaynağın en kârlı kullanımına doğru ilerlemede daha önemli bir rol oynayacaktır (Zhao & Sadler, 2007, s. 80). İkinci yaklaşım olan dinamik spektrum tahsisi, Avrupa DRiVE projesi tarafından ortaya atılmıştır (Lin Xu vd., 2000, s. 281). Farklı hizmetlerin mekansal ve zamansal trafik istatistiklerinden yararlanarak dinamik spektrum ataması yoluyla spektrum verimliliğini arttırmayı amaçlar. Başka bir deyişle, belirli bir bölgede ve belirli bir zamanda spektrum, özel kullanım için hizmetlere tahsis edilir. Ancak bu tahsis, mevcut politikadan çok daha hızlı bir ölçekte değişmektedir (Zhao & Sadler, 2007, s. 80).

Açık paylaşım modeli, spektrum ortakları olarakta adlandırılır. Bu model bir spektral bölgeyi yönetmek için temel olarak akran kullanıcılar arasında açık paylaşımı kullanır. Bu modelin savunucuları, lisanssız endüstriyel, bilimsel ve tıbbi (ISM) radyo bandında (örneğin WiFi) çalışan kablosuz hizmetlerin olağanüstü başarısından destek almaktadır. Merkezileştirilmiş ve dağıtılmış spektrum paylaşım stratejileri, başlangıçta bu spektrum yönetimi modeli altındaki teknolojik zorlukları ele almak için araştırılmıştır (Zhao & Sadler, 2007, s. 80). Açık paylaşım modeline örnek olarak 2005 yılında New Jersey'deki Rutgers Üniversitesi'nde ortak bir spektrumu paylaşan bir grup bağlantının iletimlerini koordine eden, merkezi bir spektrum sunucusunun tasarlandığı bir çalışma yapılmıştır (Raman vd., 2005, s. 1).

Hiyerarşik erişim modeli, birincil ve ikincil kullanıcılarla hiyerarşik bir erişim yapısını benimser. Bu modelde yer alan birincil kullanıcılar lisanslı kullanıcılardır. Birincil radyo kullanıcıları lisansı kullanmak için para ödemişlerdir ve dolayısıyla lisansın kullanım hakkı onlara aittir. İkincil kullanıcılar ise frekans bandını yalnızca boş olduğu zamanlarda kullanabilen ve bandın birincil kullanıcısı yayına başladığında, yayını en kısa sürede kesmesi gereken kullanıcılardır (Bayhan vd., 2007, s. 2). Hiyerarşik erişim modelinde temel fikir, birincil kullanıcılar (lisans sahipleri) tarafından algılanan paraziti sınırlandırırken lisanslı spektrumu ikincil kullanıcılara açmaktır. Birincil ve ikincil kullanıcılar arasında spektrum paylaşımına yönelik iki yaklaşım göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar; spektrum alt katman paylaşımı ve spektrum bindirme olarak bilinir (Zhao & Sadler, 2007, s. 80).

Alt katman yaklaşımı, birincil kullanıcıların girişimden korunması adına, ikincil kullanıcıların iletim gücü üzerinde ciddi kısıtlamalar getirir. İkincil kullanıcılar, iletilen sinyalleri geniş bir frekans bandı (UWB) üzerinden yayarak, son derece düşük iletim gücüyle potansiyel olarak kısa menzilli yüksek veri hızına ulaşabilirler. Birincil kullanıcıların her zaman iletimde olduğu, en kötü durum varsayımına dayanan bu yaklaşım, spektrum beyaz

alanlarının (TV White Space) algılanmasına ve kullanılmasına dayanmaz (Zhao & Sadler, 2007, s. 80).

Spektrum bindirme ilk olarak Mitola (1999) tarafından spektrum havuzu terimi altında açıklanmıştır (s.3). Daha sonra DARPA Yeni Nesil (XG) programı tarafından fırsatçı spektrum erişimi terimi altında incelenmiştir (Siddique vd., 2006). Spektrum alt katman paylaşımı yapısından farklı olarak, bu yaklaşım ikincil kullanıcıların iletim gücüne ciddi kısıtlamalar getirmekten daha ziyade yayınlarını ne zaman ve nerede iletebilecekleri konusunda kısıtlamalar getirir. İkincil kullanıcıların yerel ve anlık spektrum kullanılabilirliğini müdahaleci olmayan bir şekilde tanımlamasına ve kullanmasına izin vererek doğrudan uzamsal ve zamansal spektrum beyaz alanını hedefler (Zhao & Sadler, 2007, s. 80). Burada yer alan spektrum beyaz alanı terimi spektrum boşluğu olarakta açıklanabilmektedir (Bayhan vd., 2007, s. 3).

Hiyerarşik spektrum paylaşım modeli, dinamik özel kullanım ve açık paylaşım modelleri ile karşılaştırıldığında, mevcut spektrum yönetimi politikaları ve eski kablosuz sistemlerle en uyumlu model olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, spektrum verimliliğini üst düzeye taşımak için spektrum alt katman paylaşımı ve spektrum bindirme yaklaşımları aynı anda kullanılabilir (Zhao & Sadler, 2007, s. 81).

3.1.2 Birden Çok Birincil ve İkincil Kullanıcıyla Dinamik Spektrum Paylaşımı

Spektrum kıtlığı sorununu hafifletmek son zamanların güncel ve heyecan verici bir konusu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple bu konu hakkında hızla gelişen ve ilerleyen terminolojide bir takım karışıklıklar meydana gelmiştir. Örneğin bir çok kaynakta dinamik spektrum erişimi kavramının; yazılım tanımlı radyo (SDR) ve bilişsel radyo (cognitive radio) ile eş anlamlı olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu bağlamda dinamik spektrum erişimi ve dinamik spektrum paylaşımı ifadelerinin benzer çalışmaları kapsadığı anlaşılmaktadır.

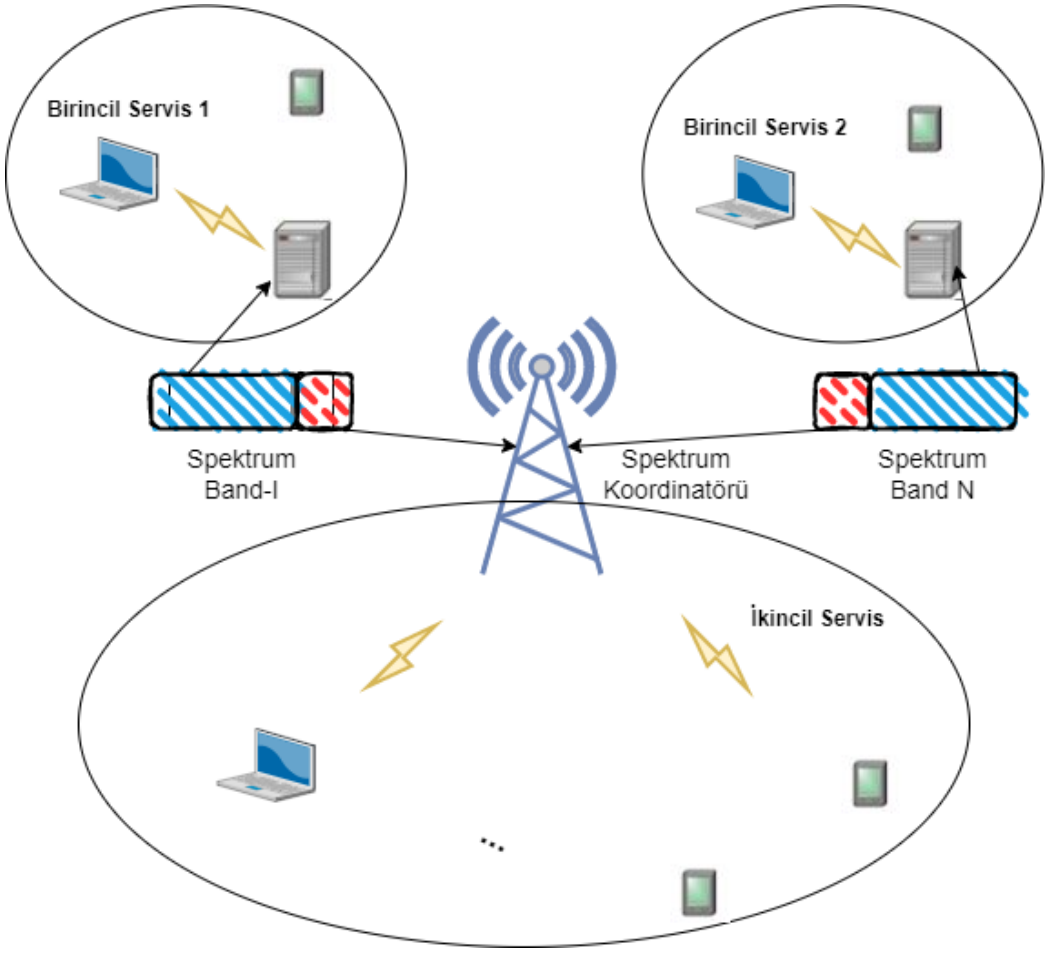
Günümüzde benimsenen spektrum tahsis politikası, kullanım hakkı için belirli spektrum bantlarını lisanslı bir kullanıcıya atamaktadır. Bu lisanslı kullanıcı, kullanım hakkı ve önceliği bakımından birincil kullanıcı olarak olarak ifade edilebilir. Dinamik spektrum paylaşımı, spektrumda esnekliği ve dolayısıyla verimliliği arttırmak adına spektrumun birincil ve ikincil kullanıcılar arasında arasında paylaşıldığı bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım aynı zamanda kullanıcıları spektrum boşluklarının yeniden kullanılmasına teşvik eder (Lin vd., 2011, s. 1756). İkincil kullanıcı kavramı, spektrum paylaşımı modeline göre lisanssız

kullanıcıları ya da lisanslı ancak kullanım önceliği olarak ikinci sırada yer alan kullanıcıları ifade edebilmektedir.

Aynı coğrafi konumda farklı birincil kullanıcılar farklı bantlarda çalışmaktadır ancak spektruma olan talep arttıkça ikincil kullanıcıların spektrumda kiralama yapma talepleri artmaktadır. Spektrum kullanıcıları kendi faydalarını en üst düzeye çekebilmek adına rasyonel bir strateji izlemek zorundadır (Lin vd., 2011, s. 1756). Şekil 3.2'de birincil ve ikincil kullanıcılar arasında gerçekleşen dinamik spektrum paylaşımının modellemesi yer almaktadır.

Şekil 3.2

Spektrum Paylaşım Modellemesi Dynamic Spectrum Sharing With Multiple Primary and Secondary Users. Lin vd., 2011, s. 1756



Şekil 3.2'de yer alan modelde birincil kullanıcıların kendi birincil hizmetleri için spektrum bantlarını kullanma hakları vardır. Ancak ek gelir elde edebilmek adına bu bandın bir kısmını (kırmızı taranmış bölge) ya da bandın kullanımı için belirli bir zaman aralığını kiralamaya isteklidirler. Hizmet kalitesi (QoS) ise her kiralamada etkilenebilecek olup, değerlendirilmesi önemli bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Modelde birincil ve ikincil kullanıcılara ek olarak ticaret işlemlerini düzenleyen bir koordinatör bulunmaktadır. Koordinatörün motivasyonu ise birincil ve ikincil kullanıcılar arasında köprü kurmak, spektrumun değerini korumak, spektrum fiyatında gerçekleşebilecek olan fahiş fiyat dalgalanmalarına engel olmak ve varsayılan ticaretten komisyon elde etmek olabilir. Özet olarak ise birincil kullanıcılar kullanmadıkları spektrumu kiralamak için bir fiyat teklif eder, koordinatör fiyatı kontrol eder, hizmet kalitesini de göz önünde bulundurarak, yakın bir fiyat teklifinde bulunan bir ikincil kullanıcının spektrumu kısıtlı olarak kullanmasına izin verir (Lin vd., 2011, s. 1756).

Bilişsel radyo ağlarına yönelik kapsamlı bir araştırmaya göre spektrum ticareti, spektrum paylaşımını gerçekleştirmenin etkili bir yoludur (Akyildiz vd., 2006, s. 2144). Spektrum ticaretinin birçok zorluğu arasında ekonomik modelleme hususu önemli bir konudur. Oyun teorisi ise bu noktada kullanıcıların davranışlarını modellemek için kullanılmaktadır (Yalçıntaş, 2015, s. 250). Geleneksel ekonomik teori bireyin karar verirken öncelikle kendi menfaatini gözetmesi gerektiğini belirtmektedir. Oyun teorisine göre ise bireyler yalnızca kendi hareketlerine ve menfaatlerine göre değil, birbirlerini gözeterek hareket ettiklerinde başarıya ulaşma ihtimallerini arttırırlar. Bu yüzden bireylerin kararlarının birbirlerine bağlı olduğu rekabetçi ekonomik piyasalarda oyun teorisi önemli bir rol oynamaktadır (Yalçıntaş, 2015, s. 251). "Ekonominin Babası" olarak anılan Adam Smith'e göre en iyi sonucu almak için gruptaki herkesin kendisi için en iyi olanı yapması gerekmektedir. Oyun teorisi ise gruptaki herkesin hem kendisi hem de gruptaki diğerleri için en iyiyi yaparak bir nash dengesi oluşturup, en iyi sonucun alınabileceğini belirtmektedir.

Yapılan bir çalışmada bu tip bir spektrum ticaretinde nash dengesi gözetilmediğinde kullanıcıların bencil davranışlarının verimlilik kaybına neden olduğu gözlemlenmiştir. Ekonomik model olarak nash dengesi kurulduğunda ise tüm kullanıcıların kazançları optimal düzeyde tutulurken, bir kullanıcının diğerlerine zarar vermeden kazanamayacağı gerçeğide unutulmamalıdır (Lin vd., 2011, p. 1758).

3.2 Spektrum Paylaşım Modellerinin Düzenleyici Bakış Açısıyla Değerlendirilmesi

Spektruma olan talep artmaya devam ettikçe, daha verimli spektrum kullanımını sağlamanın bir yolu olarak spektrum paylaşımı, düzenleyici alanda giderek artan bir ilgi düzeyi kazanmaktadır. Birkaç radyo sisteminin aynı spektrum bandında çalışabileceği, uygulanabilir bir spektrum paylaşım modeli geliştirmek için düzenleyici, endüstri ve araştırma alanları arasında yakın işbirliğine ihtiyaç vardır. Araştırma alanı, yeni spektrum paylaşım konseptlerinin inovasyonunda, test edilmesinde ve denenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, endüstriden ve düzenleyici alanlardan destek ve ilgi olmadan, bu kavramlar teorik birer kavram olarak kalmaya devam edecektir. Bu nedenle, endüstri genellikle işbirliği yaparak, finanse ederek ve gerçek sistemlerle pilot uygulamalar vasıtasıyla araştırma çerçevesini belirleyerek spektrum paylaşım konseptlerinin oluşturulmasına dahil olur. Uygulanabilir iş fırsatı ve garantili spektrum erişimi sağlayan yeni iş modelleri oluşturmak gibi sektör gereksinimlerine ek olarak, karmaşıklık ve uygulama maliyetinin de makul olması gerekmektedir. Bununla birlikte, başarılı bir spektrum paylaşım modeli için gerekli kriterler, düzenleyici bakış açısı ile araştırma veya endüstri bakış açısından açıkça farklılık gösterecektir (Mustonen vd., 2014, s. 11).

Düzenleyici çerçevede şu anda tartışılmakta olan birkaç spektrum paylaşım modeli bulunmaktadır. ABD ve Avrupa'da lisanssız TV beyaz alanı (TV white space) kavramı üzerine yapılan kapsamlı çalışmaların ardından son yıllarda lisanslamayı da kapsayan paylaşım modelleri ortaya çıkmıştır. Düzenleyici alanda incelenmekte olan en yeni spektrum paylaşım konseptlerinden ikisi: ABD'den Spektrum Erişim Sistemi (SAS) (veya üç katmanlı Hiyerarşi modeli) ve Avrupa'dan Lisanslı Paylaşılan Erişim (LSA) modelleridir (Mustonen vd., 2014, s. 11).

Avrupa'da, LSA konsepti, daha verimli spektrum kullanımı için potansiyel bir araç olarak önemli ilgi görmüştür. İlk olarak Avrupa Komisyonu (EC) tarafından, bir mobil sistemin spektrum bantlarını diğer kullanıcılarla paylaşmasına izin veren, spektrum paylaşımı için bir endüstri girişimine dayanarak tanıtılmıştır (*Report on Collective Use of Spectrum (CUS) and other spectrum sharing approaches,* 2011, s. 7). LSA, bireysel lisansa dayalı olarak yerleşik kullanım sağlanırken, herhangi bir radyo sisteminin bir frekans bandına dahil edilmesini sağlayan geniş bir düzenleyici yaklaşımdır. Bir başka tanımıyla LSA, bir bandın lisansının bireysel bir kullanıcıya tahsis edildiği rejime uyan tamamlayıcı bir spektrum yönetim aracıdır. Bu yaklaşımın, banda tahsis edilmiş yerleşik hizmetleri korurken yeni kullanıcıların bir frekans bandına girişini kolaylaştıracağı öngörülmektedir

(CEPT Electronic Communications Committee, 2014, s. 2). LSA lisansı, ilgili paylaşım çerçevesiyle birlikte, bantta yer alan yerleşik kullanıcı ve LSA lisansı sahibi olmak için banda yeni giren kullanıcı arasında müzakere edilir ve lisans ulusal düzenleyici otorite (NRA) tarafından verilir (CEPT Electronic Communications Committee, 2014, s. 23). Paylaşım çerçevesiyle birlikte LSA lisansı, girişim üzerinde tam kontrole izin verecek ve tüm kullanıcılara belirli hizmet kalitesinin sağlanmasına olanak tanıyacaktır.

Genel LSA kavramı her tür radyo sistemi arasındaki paylaşımı kapsarken, standardizasyon ve düzenlemelerdeki mevcut faaliyetler özellikle LSA'in Uluslararası Mobil Telekomünikasyon (IMT) bantlarına uygulanmasına odaklanmaktadır (*Report on Collective Use of Spectrum (CUS) and other spectrum sharing approaches*, 2011, s.18). 2.3-2.4 GHz bandı LSA için ilk kullanım durumu olarak incelenmiştir.

ABD'de büyük ilgi gören bir diğer veri tabanı merkezli paylaşım modeli, spektrum kullanımında üç hiyerarşi düzeyi ile spektrum paylaşımını destekleyen spektrum erişim sistemidir (SAS) (President's Council of Advisors on Science and Technology, 2012, s. 74). SAS, yetkili kullanıcıların üç katmanını yönetmek için dinamik bir spektrum veri tabanı ve parazit azaltma teknikleri içerir. Böylece SAS, bant genelinde gelişmiş, yüksek düzeyde otomatikleştirilmiş bir frekans koordinatörü olarak hizmet eder. Sonuç olarak hiyerarşide üst düzeyde yer alan kullanıcılar alttakilerden korunmuş olur ve bantta maksimum kapasite ve birlikte var olabilmeye izin vermek için frekans kullanımı optimize edilir. Bu yaklaşımda yerleşik sistemler, ağlarını veya sistemlerini kurdukları zaman ve yerde, özel spektrum erişimi ve zararlı parazitlere karşı garantili koruma dahil olmak üzere en yüksek düzeyde kullanım haklarına sahiptir. (FCC, 2015, s. 5).

İkincil lisans sahipleri orta seviyeyi işgal eder ve genellikle ticari bir hizmet sağlayıcısı, yani bir hücresel hizmet sağlayıcısı olmaları beklenir. İkincil lisans sahibi, belirli bir coğrafi alan için Öncelikli Erişim Lisansı (PAL) olarak adlandırılan kısa vadeli, öncelikli işletim haklarına sahip olacaktır. Bir FCC lisansına sahip olmaya uygun herhangi bir kuruluş, bir PAL lisansı için başvurmaya ve bu lisansa sahip olmaya hak kazanır. Öncelikli Erişim Lisansları 3550-3650 MHz frekans aralığında Vatandaş Geniş Bant Radyo Servisi (CBRS), talep sayısına bağlı olarak açık artırma yoluyla verilen lisanslardır. Lisans sahipleri belirli bir süre boyunca (CBRS sistemi için 3 yıl) 10 MHz'lik bir kanal kullanabilirler. PAL lisansı, genellikle fırsatçı kullanım olarak adlandırılan hiyerarşinin üçüncü seviyesine karşı girişim korumasını garanti eder (FCC, 2015, s. 7-8).

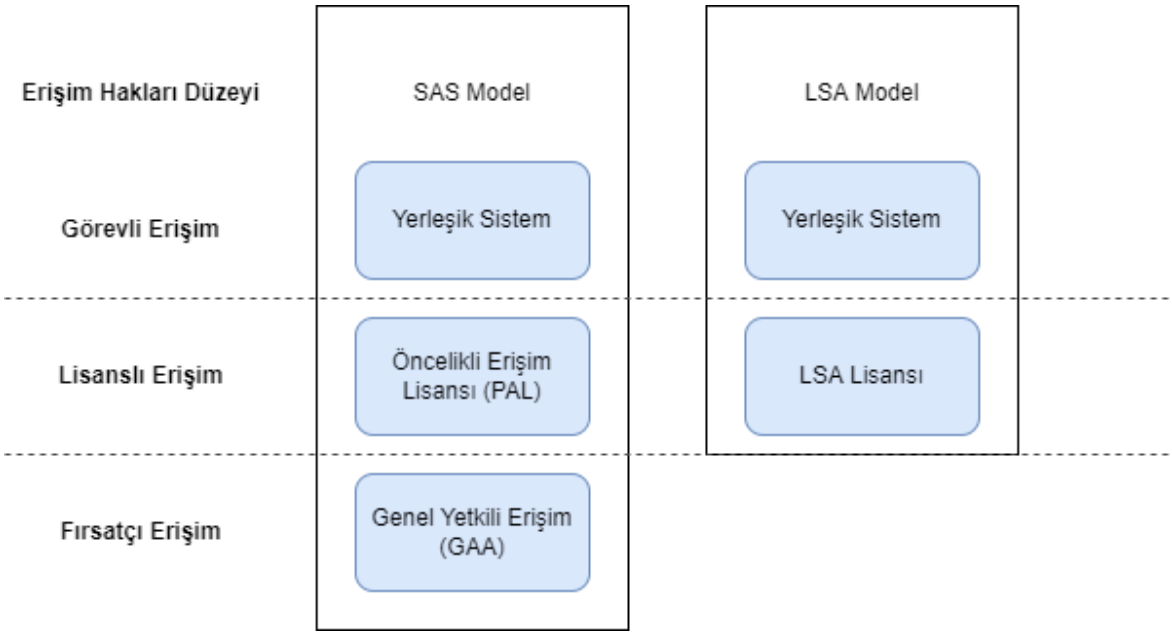
Üçüncü erişim düzeyi, Genel Yetkili Erişim (GAA) olarak adlandırılır. Bu erişim düzeyi bir Wi-Fi'a benzer şekilde hafif lisanslıdır. GAA cihazının, sistemi koordine eden

SAS ile etkin bir şekilde etkileşime girebilmesi kritik bir noktadır. GAA kullanıcılarının, hem yerleşik hem de PAL lisans sahibi tarafından kullanılmayan bir coğrafi alan veya zaman aralığındaki belirli bir spektrum bandına fırsatçı bir şekilde erişmelerine izin verilir. PAL ve GAA için ayrılan spektrum miktarı ve PAL lisans süreleri bu yaklaşıma olan talebi belirleyici bir etken olacaktır (FCC, 2015, s. 9).

SAS'ın temel işlevleri arasında belirli bir coğrafi konumdaki mevcut frekansların belirlenmesi ve atanması; kullanıcı bilgilerinin ve konumunun kaydı, doğrulanması ve tanımlanması ile görevlinin zararlı müdahalelerden korunması bulunmaktadır. SAS modeli, herhangi bir bantta ve herhangi bir sistem arasında uygulanabilen genel bir çerçeve olarak değerlendirilmektedir (FCC, 2015, s. 20).

Şekil 3.3

Paylaşım Modellerindeki Farklı Seviyelere Genel Bakış Evaluation of recent spectrum sharing models from the regulatory point of view. Mustonen vd., 2014, s. 12



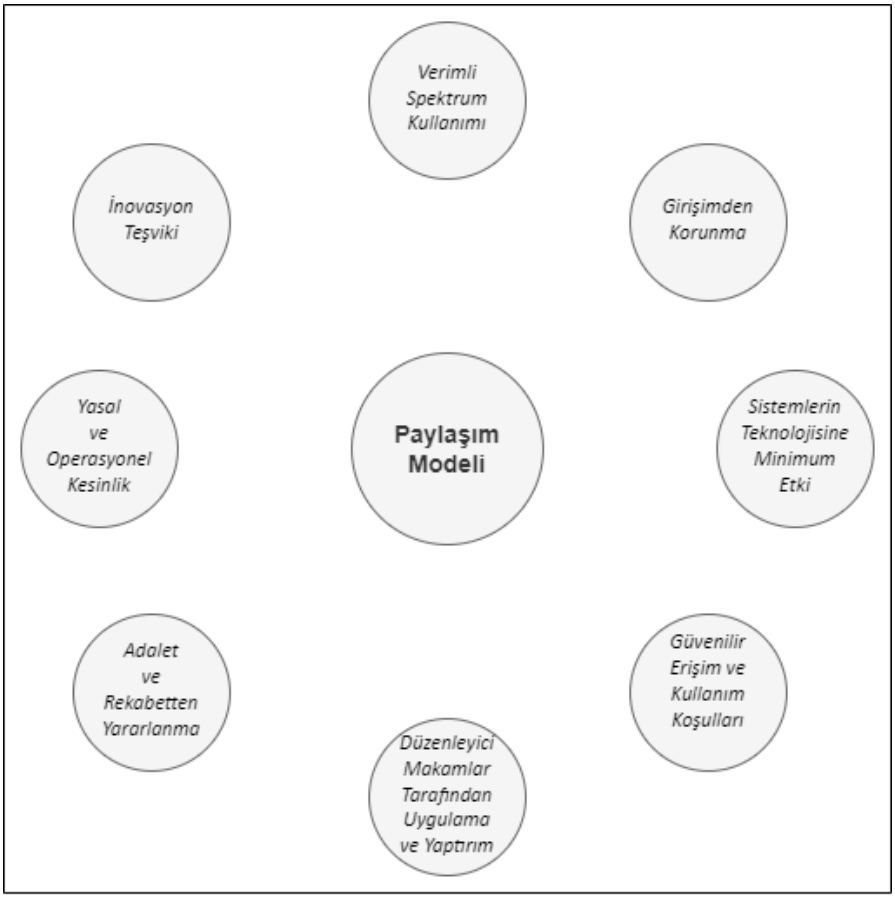
Şekil 3.3'te de görüldüğü üzere yerleşik spektrum kullanıcılarının haklarının korunması her iki modelin de başlangıç noktasıdır. Ek kullanıcılar, yerleşik kullanıcıların spektrumu kullanmadığı zamanlarda ve coğrafi alanlarda devreye girmektedir.

3.2.1 Başarılı Bir Spektrum Paylaşım Modeli İçin Düzenleyicilerin Kriterleri

Şekil 3.4'te spektrum paylaşım modelinin uygulanabilir olması için düzenleyici bakış açısıyla gereken kriterler yer almaktadır. Bahsi geçen bu kriterler aşağıda incelenmiştir.

Şekil 3.4

Başarılı Bir Spektrum Paylaşım Modeli için Düzenleyicilerin Kriterleri Evaluation of recent spectrum sharing models from the regulatory point of view. Mustonen vd., 2014, s. 1



3.2.1.1 Verimli Spektrum Kullanımı

Verimli spektrum kullanımının teşvik edilmesi, düzenleyici kuruluşlar için önemli bir kriterdir. Yeni ve çeşitli radyokomünikasyon hizmetleri için yeni spektrum talebi artmaya

devam ettikçe, bu talebe yanıt vermek düzenleyiciler için giderek daha zor hale gelmektedir. Bu sebeple daha verimli spektrum kullanımı için yeni yaklaşımlar, düzenleyicilerin odak noktası olmaktadır. Bu noktada; mevcut hizmetleri geliştirme, daha iyi kapsama alanı oluşturma, yeni hizmetler sunma kabiliyeti veya bu özelliklerin bazı kombinasyonları ile spektrum verimliliğinde ölçülebilir kazançlar elde etmek gibi hususlar önem kazanmaktadır.

3.2.1.2 Girişimden Korunma

Düzenleyiciler, özellikle paylaşım modelinin girişime karşı korumayı nasıl ele aldığıyla ilgilenmektedir. Mevcut spektrum kullanıcısına ve yeni kullanıcıya yönelik zararlı girişimi en aza indirmek için çeşitli teknik önlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bantların yerleşik kullanıcıları tarafından kullanımına ve ek kullanıcıların iş modeline bağlı olarak, paylaşılacak bantta faaliyet gösteren mevcut hizmetlerin korunmasını sağlamak için zaman, frekans ve uzay alanındaki olası tüm teknik önlemlerin dikkate alınmasının gerekli olduğu değerlendirilmektedir (Mustonen vd., 2014, s. 13).

Alternatif olarak, bantta kullanım hakkı olan yerleşik kullanıcının iş modeli zamana dayalı paylaşıma izin veriyorsa, koordinasyon için veri tabanı odaklı bir zaman dilimi rezervasyon sistemi kullanılabilir. Bir radyo vericisinin iletime başlamadan önce iletim ortamını algılaması olarak bilinen konuşmadan önce dinle (LBT), dinamik frekans seçimi (DFS) ve iletim gücü kontrolü (TPC) gibi girişim azaltma teknikleri paylaşımı gerçekleştirmek için kullanılabilir. Ek kullanıcıların, bantların veya lisansın sınırlamalarını karşılayarak, yerleşikleri korumak için teknik olarak uygun adımları atması gerekir. Ayrıca ek kullanıcılar da zararlı parazitlerden korunmalıdır, ancak bu korumalar, yerleşik sisteme sağlanan korumalara göre ikincil derecede öncelik taşımaktadır (Mustonen vd., 2014, s. 13).

3.2.1.3 Sistemlerin Teknolojisine Minimum Etki

Başarılı bir spektrum paylaşım modeli için düzenleyicilerin dikkate alması gereken diğer bir kriter ise, yeni sistemlerin mevcut sistemlerle uyumlu olması ve ideal olarak üzerlerinde herhangi bir değişiklik yapılmaması gerektiğidir. Ek kullanıcıların teknolojisi, bantların yerleşik kullanımındaki olası gelişmeleri etkilememeli veya yenilik için yatırımı engellememelidir. Bu durum, gelecekte bantları paylaşabilecek yeni kullanıcılar hatta şu anda bitişik bir bantta bulunan veya gelecekte bulunabilecek olanlar için geçerlidir. Mevcut

kullanımın teknik parametreleri ve sınırlamaları, yeni kullanıcılar için tek sınırdır. Genellikle mevcut hizmetin lisansları ile sağlanan bu çerçevede, yeni kullanıcı sağlanacak teknoloji ve hizmete karar vermekte özgürdür. Zararlı girişim koşullarının oluşmasını önlemek için yeni hizmetler, etkilenebilecek mevcut kullanıcılarla koordineli olmalıdır (Mustonen vd., 2014, s. 13).

3.2.1.4 Güvenilir Erişim ve Kullanım Koşulları

Bir paylaşım modelinin temel gereksinimlerinden biri, paylaşıma sunulan kaynağa öngörülebilir erişim ve güvenilir kullanım koşullarının sağlanmasıdır. Bu noktada, yeni kullanıcılar ile birlikte, muhtemel ek kullanıcılar için planlanan iş modellerinin başarılı bir şekilde çalışabilmesi maksadıyla ilgili bir çerçeve oluşturulması gerekmektedir (Mustonen vd., 2014, s. 13).

3.2.1.5 Düzenleyici Makamlar Tarafından Uygulama ve Yaptırım

Spektrum paylaşım düzenlemelerinin uygulanması, spektral olarak verimli bir dinamik spektrum paylaşım sisteminin geniş çapta başarılı bir şekilde uygulanmasının kritik bir bileşeni olacağı düşünülmektedir (FCC Technological Advisory Council, 2014, s.21). Paylaşım modeli, hem iletim öncesi hem de sonrası, düzenleyicilerin kendi ulusal çerçevelerine uyumlu olarak doğrudan uygulanmasına ve olası yaptırımlarına izin veren önlemlerden oluşmalıdır. Pratikte bu uygulama, düzenleyicilerin tüm kullanıcıların uygulanan kurallara göre hareket ettiğini izleme yeteneğine sahip olduğu anlamına gelir (Mustonen vd., 2014, s. 13).

Düzenleyiciler, ulusal bazda paylaşılabilir frekans bantlarına verimli erişim sağlamaktan sorumludur. Uygulanabilirlik ise ulusal veya bölgesel koşullara bağlı olarak bantların lisanslanması yoluyla ulusal yetkilendirme süreçlerine dayanır (Buckwitz vd., 2014, s. 145). Yaptırımlara izin verecek olan uygulama, konuşlandırılacak ağlar veya cihazlar için uluslararası standartların önceden belirlenmesiyle de desteklenebilir (Mustonen vd., 2014, s. 13).

3.2.1.6 Adalet ve Rekabetten Yararlanma

Spektrum paylaşım modellerinin, belirli bir kuruluşa özel avantaj sağlamaması, yeni oyuncuların girişini teşvik etmesi ve pazarlara giriş engelini azaltması beklenmektedir. Ek kullanım fırsatları, rekabete ve adalete izin verecek ihale prosedürlerine de tabi olabilir. Bu, özellikle belirli kullanım için bölgesel olarak uyumlu hale getirilmiş, ancak bazı düzenleyiciler tarafından farklı amaçlar için atanmış bantlar için geçerlidir. Bantlara şeffaf ve ayrımcı olmayan erişim ilkesine saygı gösterilmelidir (Radio Spectrum Policy Group, t.y., s. 22).

3.2.1.7 Yasal ve Operasyonel Kesinlik

Herhangi bir spektrum paylaşım modelinde, görevliler ve yeni kullanıcılar arasındaki veri alışverişi güvenli olmalı, güncel ve doğru bilgiler içermelidir. Burada özellikle ilgi çekici olan, operasyonel veri tabanlarının güvenliği ve iş vakasıyla ilgili bilgilerin güncel oluşudur (Mustonen vd., 2014, s. 13).

3.2.1.8 İnovasyon Teşviki

Kamuya hizmet sağlamak ve ilgili iş modellerinin yaratılması yoluyla yatırımları teşvik etmek için herhangi bir yeni teknolojinin tanıtılması, yeniliği teşvik etmenin anahtarıdır. Genel olarak herhangi bir paylaşım modeli bu ilkeye uymalıdır. Temelde bir spektrum paylaşım modeli, spektruma erişim sağlamak için gereken süreyi kısaltarak yeniliğe teşvik etmelidir. Bu süre kısaldıkça daha yerelleştirilmiş hizmetler için yeni iş modelleri ortaya çıkabilir. Spektrum paylaşımı yaklaşımları, sistemler arasında paylaşımı optimize etmek adına paraziti azaltma tekniklerinin de gelişimini teşvik edebilir. Ayrıca, uzun vadede mevcut spektrum tarafından daha fazla hizmetin desteklenmesi fırsatı sunar. Bu, daha fazla hizmetin oluşturulmasına ve iş modellerinin gerçek dünya dağıtımlarında keşfedilmesine olanak tanır (Mustonen vd., 2014, s. 14).

3.3 Blok Zincir Teknolojisinin Spektrum Paylaşımına Uygulanması

Tezin bu kısmında DLT'nin bir alt kümesi olan blok zincir teknolojisinin spektrum paylaşımına uygulanmasına yönelik kilit kavramlar incelenmiş, bu kilit kavramların dinamik spektrum paylaşımı yaklaşımlarıyla uygulanabilirliği incelenmiştir. Devamında ise blok zincir tabanlı spektrum paylaşımına yönelik iki ayrı yaklaşım ele alınmış ve bu yaklaşımlarla alakalı tartışmaların üzerinde durulmuştur.

3.3.1 Blok Zincir Tabanlı Dinamik Spektrum Paylaşımı için Kilit Kavramlar

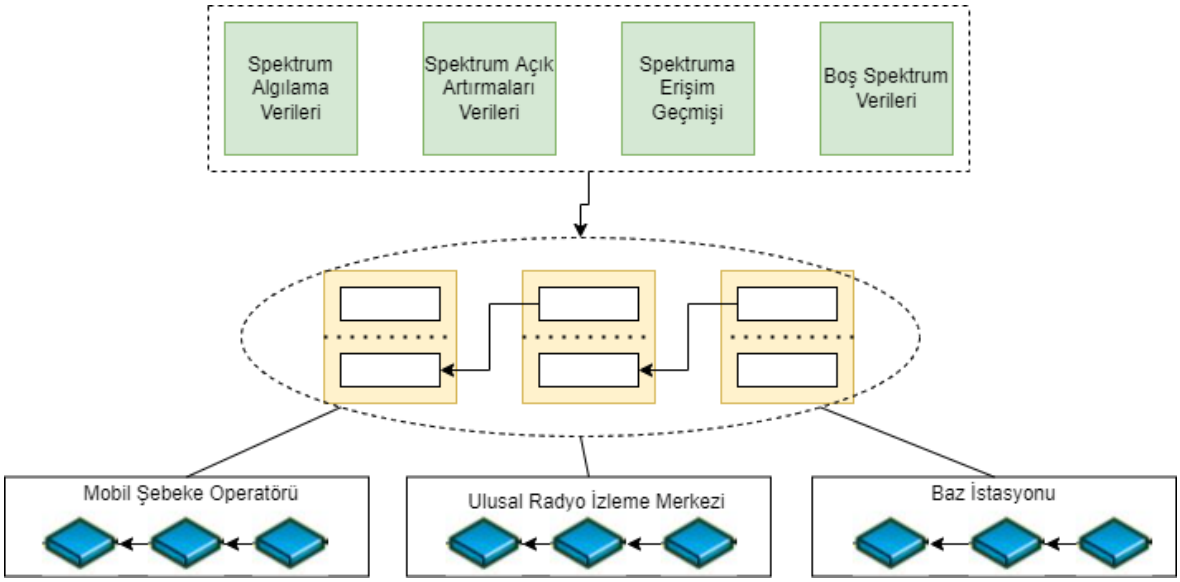
Blok zincir tabanlı dinamik spektrum paylaşımı yaklaşımlarında avantajlı bir paylaşım mekanizması oluşturabilmek adına çeşitli kilit kavramlar yer almaktadır. Aşağıda bu kavramlar özetlenecektir.

3.3.1.1 Güvenli Spektrum Defteri

Blok zincir tarafından sağlanan dağıtılmış defter, spektrum işlem kayıtlarının açık, şeffaf, değişmez ve izlenebilir olmasını sağlamaktadır. Böylece dolaşımdaki çeşitli bağlantılar arasında güvenilir bir ilişki kurulur. Bu durum spektrum paylaşımının uygulanmasını büyük ölçüde teşvik eder. Buradan hareketle, blok zinciri tabanlı dinamik spektrum paylaşımı'nın (DSS) temelinde spektrum bilgilerini kaydeden dağıtılmış bir defter olduğu söylenebilir (Zheng vd., 2020, s. 582).

Şekil 3.5

Spektrum Defteri Gösterimi Blockchain and Trustworthy Systems. Zheng vd., 2020, s. 582



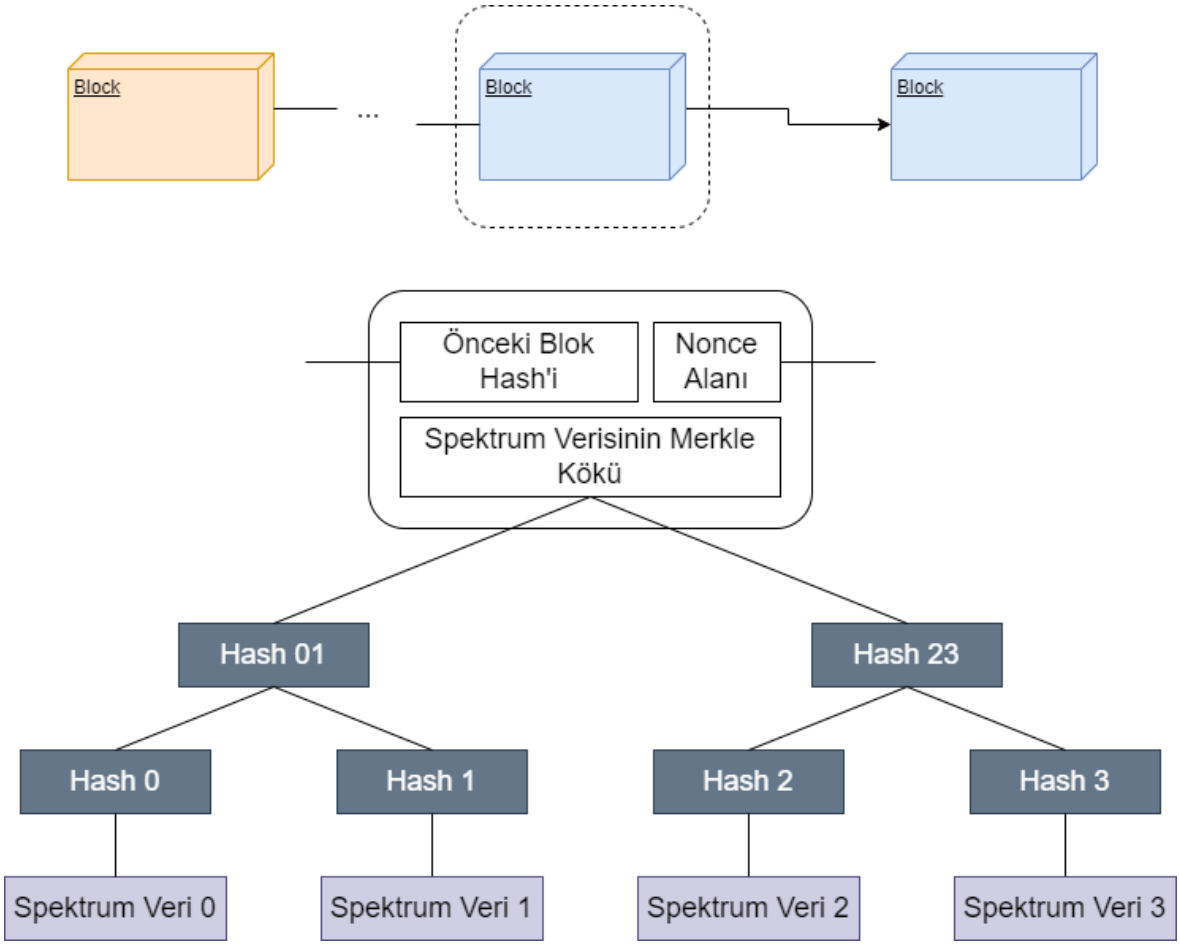
Spektrum için yapılan açık artırmalar, spektrum erişim geçmişi ve boş spektrum gibi bilgilerin yanı sıra, spektrum defteri ayrıca harici spektrum algılama ekipmanından gelen spektrum algılama verilerini de içermelidir. Spektrum defterine kaydedilen bilgiler, spektrum kaynaklarının verimli paylaşımı, adil işlemler, etkin yönetim ve kontrol için bir temel sağlamaktadır (Zheng vd., 2020, s. 578). Fakat düğümlerde oluşabilecek olası saldırılara karşı spektrum defteri hash hesaplamasına dayalı olarak tasarlanmalı ve uygulanmalıdır (Zheng vd., 2020, s. 582). Bu amaçla, spektrum defteri modeli Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

Spektrum bilgisi genellikle büyük miktarda veri içermektedir. Bu nedenle blokta depolamayı sağlamak için spektrum verisine, veri sıkıştırma veya ön işleme teknikleri uygulanabilir (Zheng vd., 2020, s. 582).

Şekil 3.6 spektrum veri bloğunun mimarisini göstermektedir. Belirli bir periyotta üretilen spektrum verileri, bir hash değeri oluşturmak için hashlenir. Her spektrum verisinin hash değeri bir Merkle ağacı oluşturacak şekilde düzenlenir ve böylece spektrum verisindeki herhangi bir değişiklik Merkle ağacının köküne yansıtılabilir (Zheng vd., 2020, s. 582).

Şekil 3.6

Spektrum Bloğu Mimarisi Blockchain and Trustworthy Systems. Zheng vd., 2020, s. 583

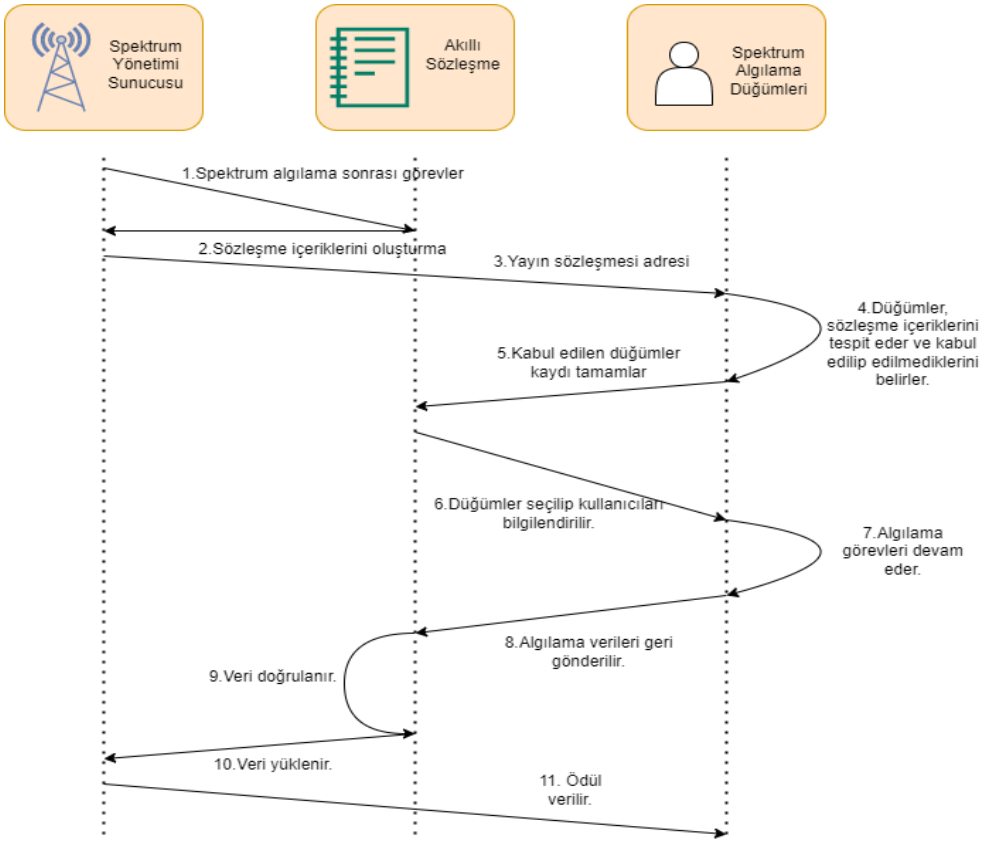


3.3.1.2 Akıllı Sözleşmeler

Spektrum ticareti akıllı sözleşmelerden yararlanarak, güvenilir bir üçüncü tarafa gerek kalmadan sözleşme şartlarını yerine getirip, otomatik ve güvenli bir şekilde tamamlanabilir. Ek olarak, dijital kodlar şeklinde tanımlanan akıllı sözleşmeler; dinamik spektrum paylaşımını kolaylaştıran spektrum yönetimi, varlık transferi ve spektrum işlem bilgilerine esnek bir şekilde yerleştirilebilir (Zheng vd., 2020, s. 584).

Şekil 3.7

Akıllı Sözleşme Tabanlı Spektrum Algılama Blockchain and Trustworthy Systems. Zheng vd., 2020, s. 584



Şekil 3.7'de gösterildiği gibi; tetikleme koşulları, yanıt kuralları ve sözleşme koşullarının güvenilir veri kaynakları, akıllı sözleşme kodlarında önceden ayarlanmıştır. Tetikleyici koşullar, sistemin düzenini sağlamak için belirli işlem zamanını, veri kaynaklarını ve paylaşım kurumlarını içermektedir. Akıllı sözleşmelerde bir eylem karşılığında ücret için anlaşılmışsa, borcun ifası gibi tetikleyici işlem gerçekleştiği zaman eylem sözleşme tarafından kendiliğinden gerçekleşir. Yanıt kuralları, işlemlerin meşruiyetini sağlamak için belirli ticari işlemleri, yasal anlaşmaları vb. içerir (Zheng vd., 2020, s. 583).

Veri kaynakları esasında bir spektrum işlemine, her iki tarafça paylaşılabilen spektrum veri kaynağı bilgilerini sağlar. İkinci olarak, akıllı sözleşme, karşılıklı anlaşma ve birden fazla tarafça imzalandıktan sonra kullanıcı tarafından başlatılan işlemle birlikte ağdaki düğümlere yayınlanır. Madenciler bunları doğrular ve doğrulamadan sonra belirli bir

blokta saklar. Kullanıcılar, iade edilen sözleşme adresini ve sözleşme arayüzünü aldıktan sonra bir işlem başlatarak sözleşmeleri arayabilir. Madenciler, sistemin önceden ayarlanmış etkinleştirme mekanizması tarafından teşvik edilir ve işlemin geçerliliğini doğrulamak için kendi depolama ve bilgi işlem kaynaklarını sağlar. Sonunda, ticaret doğrulaması paketlenir ve doğrulandıktan sonra yeni veri bloğuna eklenir. Yeni blok, fikir birliği mekanizması tarafından doğrulanır ve blok zincirinin ana zincirine bağlanır. Tüm güncellemeler yürürlüğe girer ve madenciler blok ödüllerini alır (Zheng vd., 2020, s. 583).

3.3.1.3 Spektrum Ticareti Mekanizması

Spektrum ticareti ağındaki her bir katılımcının durumu oldukça dinamiktir. Farklı katılımcıların ticaret anlaşmalarını etkin bir şekilde ayırmak için her bağımsız bloğa akıllı sözleşmeler eklenir. Qiu, Grace, Ding, Yao ve Wu (2020) çalışmalarında insansız hava aracı (UAV) kullanıcıları ve mobil operatörler arasında spektrum ticareti anlaşması ve madencilik ödülleri için spektrum coin (SC) kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir (s. 4). Kotobi ve Bilen'ın (2018) çalışmalarında ise SC, bilişsel radyo ağlarının veri iletimi, ikincil kullanıcılar ve birincil kullanıcılar arasında spektrum kiralama ve blok ödülleri için ödeme yapmak için kullanılır (s. 2).

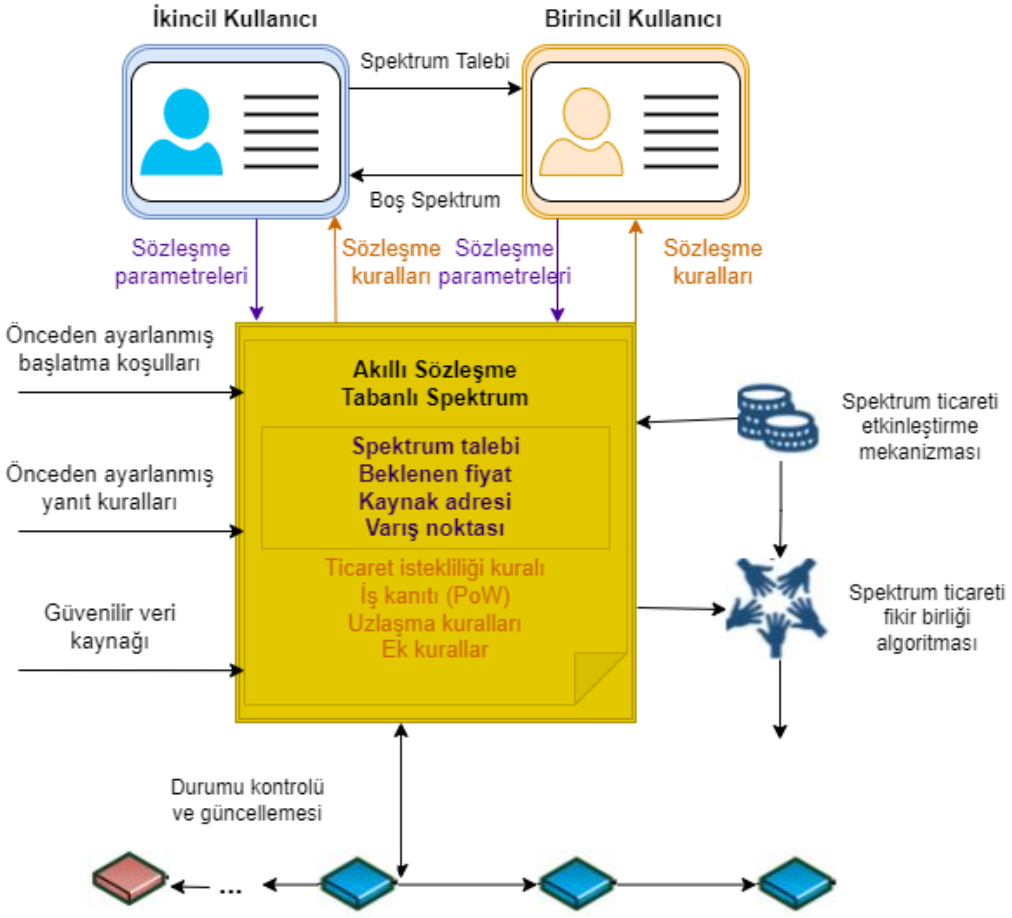
Yapılan çalışmalardan çıkarılabileceği üzere, blok zinciri tabanlı DSS'de SC, spektrum ödemesi, ticaret doğrulama ödülleri ve blok oluşturma ödülleri vb. dahil olmak üzere spektrum ticaretini kolaylaştırmak için kullanılabilir. SC kullanılan olası bir spektrum ticaret şeması Şekil 3.8'de gösterilmektedir.

Şekil 3.8'de yer alan modelde blok zincirin parçalarını oluşturan birden fazla spektrum yetkilisi kullanıcı bulunmaktadır. Birincil spektrum kullanıcıları, spektrum yetkilendirme kullanıcıları ve spektrum kaynaklarını aktaran kullanıcıları içermektedir. İkincil spektrum kullanıcıları ise spektrum kaynakları talep eden veya kiralayan kullanıcıları içerir. Spektrumun birincil kullanıcıları ve ikincil kullanıcıları, spektrum kaynaklarını ve gereksinimlerini ağdaki tüm düğümlere yayınlar. Akıllı sözleşme, teklif verme ve frekans kullanım süresi gibi istek bilgilerine göre kullanıcılarla otomatik olarak iletişim kurar. Spektrum ticaret bilgileri sonunda spektrum defterine yazılır. İşlem tamamlandıktan sonra birincil ve ikincil kullanıcıların itibar değerleri eşzamanlı olarak güncellenir. Bu spektrum ticareti yöntemi ile ikincil kullanıcılar, belirli bir miktarda SC harcayarak gerekli spektrum

kullanım haklarına sahip olurken, birincil kullanıcılar ise spektrum kullanım haklarından vazgeçerek eşdeğer SC'ler elde eder (Zheng vd., 2020, s. 585).

Şekil 3.8

Akıllı Sözleşme Tabanlı DSS Blockchain and Trustworthy Systems. Zheng vd., 2020, s. 585



3.3.2 Dinamik Spektrum Paylaşımı İçin Dağıtılmış Defterler

5G teknolojisi ile birlikte kablosuz hizmetlere yönelik artan talep, spektrumun etkin bir şekilde paylaşılmasına ve yetersiz kullanımından kaçınılmasına yönelik ciddi bir ihtiyaç doğurmaktadır. Lisans sahipleri yani spektrumda belirli bir bandı kullanım hakkı olanlar, tahsislerini sürekli olarak kullanmadıklarında kaynakların boşa gitmesine neden olurlar. Bu noktada ilk akla gelen lisanssız spektrum kullanımı da bir çözüm değildir. Lisanssız spektrum kullanımı; daha düşük giriş engelleri sunmasına rağmen, hizmet kalitesi (QoS)

garantilerinin olmaması dezavantajına sahiptir (Song vd., 2019, s. 42). Teknik çözümler olgunlaştıkça ve düzenleyici ve ticari teşvikler ortaya çıktıkça, daha yüksek düzeyde koordinasyon ve paylaşımın daha fazla kabul görmesi beklenmektedir. Ancak lisanslı spektrumun yerleşikleri, yalnızca gelir artışı şeklinde faydalar varsa spektrumu paylaşmaya istekli olacaktır. Bu faydalara örnek olarak ise yeni kullanıcılardan spektrum karşılığı alınan ödemeler veya yetersiz kullanılan spektrum için düzenleyiciye ödenen spektrum ücretleri planlanabilir (Lavender & Hogg, 2015, s. 11).

Dağıtılmış defter teknolojileri (DLT); şeffaflığı, otomasyonu ve ademi merkeziyetçiliği sağlayarak kullanıcıları spektrum kullanımlarını paylaşmaya ve koordine etmeye yönlendirmede faydalı olabilir. Teknik olarak, blok zinciri teknolojisi, tek bir tarafın kontrolüne sahip olmadığı, güvenli, merkezi olmayan bir veri tabanı biçimi olarak DLT'yi uygular (Werbach, 2018, s. 90).

Blok zincirler DLT'nin bir alt kümesi olsa da, literatür çoğu DLT'yi blok zinciri olarak adlandırdığı için bu iki terim birbirinin yerine kullanılabilmektedir. Dağıtılmış bir defter, bağımsız katılımcıların (düğümlerin) depolanan kayıtlar üzerinde bir anlaşma oluşturmasını sağlayan bir elektronik kayıt sistemidir. Bu düğümlerin, kayıtların sıralaması üzerinde anlaşmaya varması ve bunlardaki işlemleri kriptografik olarak doğrulaması gerekir. Kayıtlar, verilerin birden çok düğüm arasında kopyalanmasıyla kalıcı hale getirilir. Kayıtların her biri kriptografik karmalarla bağlanarak kurcalanmaya karşı koruma oluşturulmuş olur. Anlaşma veya fikir birliği sürecinin ortak sonucu, defterdir ve kayıtların yetkili versiyonu olarak hizmet eder. Dağıtılmış defterler karmaşık kriptografik veri yapıları kullanır (Sengul, 2020, s. 7).

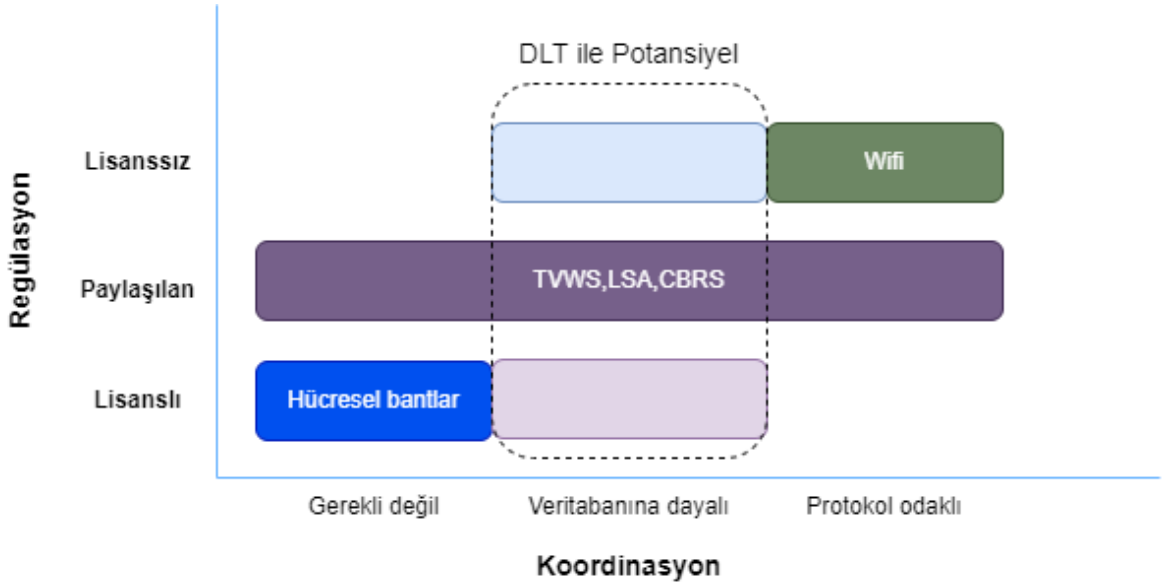
Dağıtılmış defteri güncel tutmak isteyen ilgili taraflar ağın tüm düğümlerinde verileri doğrulamak, kaydetmek ve işlemek için güvenli, esnek, şeffaf ve merkezi olmayan bir yol sunar. Bu sistem tarafından sağlanan ademi merkeziyetçilik, otomasyon ve doğrulanabilir güvenin, düzenleyici ve teknolojik gelişmelerin etkilerine ek olarak, iş hedeflerine hizmet ederek spektrum paylaşımını ve ticaretini kolaylaştırabileceği düşünülmektedir (Sengul, 2020, s. 7).

Coğrafi konum teknolojileri, spektrum algılama ve veri tabanlarındaki teknik gelişmeler; dinamik ve esnek spektrum yetkilendirmesi için uygun temeller oluşturmaktadır. Bununla birlikte, bir çözümün başarısı, talebin doğasına bağlıdır. Bu noktada; kaç kullanıcının spektrumu paylaşmak istediği, farklı hizmet ve dağıtım türlerinin çeşitliliği, kapasiteleri ve QoS gereksinimleri ve dağıtımları koordine etmenin karmaşıklığı gibi hususlar önem arz etmektedir (OFCOM, 2017, s. 24). Ayrıca, spektrum kullanıcılarının,

yalnızca ilk atama esnasında değil, kullanımlarına sürekli olarak karar verebilmeleri görüşü yaygınlaşmaya başlamıştır. Paylaşım düzenlemeleri için gerekli tazminat mekanizmaları da önemli bir rol oynamaktadır (Sengul, 2020, s. 7).

Şekil 3.9

Spektrum Paylaşımı: Mevcut Durum ve DLT ile Potansiyeli UK Distributed Ledgers for Spectrum Authorization. Sengul, 2020, s. 8



Dağıtılmış Defter Teknolojisi (DLT) aşağıdakileri kolaylaştırarak spektrum paylaşımı ve ticareti için gerekli teşvikleri oluşturabilir.

• Kurumlar arası kayıt tutma ve şeffaflık yoluyla güven: Defter, verilerin toplu olarak kaydedilmesi ve noter tasdiki için yetkili bir işlem günlüğü görevi görür. Spektrum varlıklarının kaynağı ve hareketi, sanal sertifikalar aracılığıyla defterde izlenebilir (Sengul, 2020, s. 7).

• Akıllı sözleşmeler yoluyla otomasyon: Spektrum, defter tabanlı bir pazarda akıllı sözleşmeler kullanan katılımcılar arasında alınıp satılabilir. Bu pazar, uzun vadeli sözleşme modelinden, işleme dayalı isteğe bağlı platform modeline geçişi sağlar. Akıllı sözleşmeler aracılığıyla şirketler ile ortakları ve müşterileri arasındaki anlaşma süreçlerinin otomatikleştirilmesinin, sözleşmeleri başlatmak, müzakere etmek ve sonuçlandırmak için işlem süresini ve idari maliyetleri azaltması beklenmektedir (Al-Jaroodi & Mohamed, 2019, p. 36502).

• Çok taraflı bir arada var olmanın merkezi olmayan optimizasyonu: Spektrum kullanılabilirliği hakkındaki veriler toplu olarak yönetilebilir ve bir arada var olmadaki sürtüşmelerin üstesinden gelmek ve paraziti iyileştirmek için kullanılabilir (Sengul, 2020, s. 7).

DLT; güvenilmeyen, rekabetçi ancak işbirlikçi paydaşlar arasında hem spektrum varlıklarını hem de kuruluşlar arası verileri, değiş tokuş etmek için gerekli işbirliğini kolaylaştırabilir (Yrjölä, 2018, s. 130). Aşağıda, hibrit bir DLT sisteminin sistem modeli, yönetişimi ve operasyonel katmanları incelenmektedir.

3.3.2.1 Spektrum Varlıkları ve Ödeme Modeli

Dağıtılmış bir defter üzerinde spektrum varlıklarını temsil etmek için, uzay ve zaman ölçeğinde iyi tanımlanmaları gerekmektedir. Bu noktada ölçeğin küçük tutulması, ortaya çıkan spektrum piyasasının akıcı olmasına sebep olabilir (Andrews vd., 2014, s. 11). Bu ölçeği kullanarak, spektrum hakları tokenlaştırılır, yani varlığa ilişkin yasal mülkiyet hakları, DLT tabanlı sistemde alınıp satılabilen varlık jetonları olarak temsil edilir. Token kelimesi Türkçe'ye belirteç olarak çevrilebilmektedir ancak belirteç kelimesi farklı kavramlarıda kapsayabileceğinden, token ifadesi genelde Türkçe'ye çevrilmeden kullanılmaktadır. Basitçe token, kripto para blok zinciri üzerinde çalışan belirli dijital varlıkları tanımlamakta kullanılmaktadır ("Token nedir?," t.y.). Tokenlar benzersiz bir dijital veya gerçek varlığın mülkiyet haklarını temsil edebilmektedir. Başka bir tanımla, token; kendi blok zincirinde bulunan ve sahibinin onu yatırım veya ekonomik amaçlarla kullanmasına izin veren, ticareti yapılabilen bir varlığı veya hizmeti temsil eder. Tokenların spektrum paylaşımı için DLT'lerde kullanım potansiyeli ise takas edilebilir veya saklanabilir oluşundan kaynaklanmaktadır ("Token nedir?," t.y.).

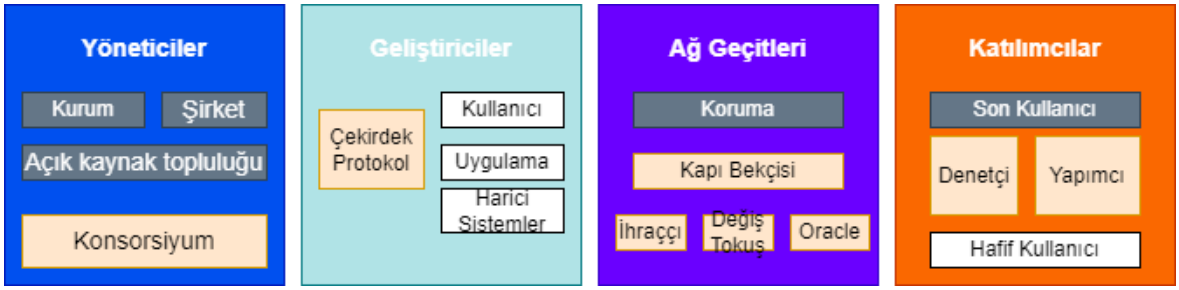
Sistem ayrıca ikincil kullanıcılarla spektrum paylaşımı veya spektrum algılama gibi hizmetler sonucunda kazanılan yardımcı program tokenlarını da destekleyebilir (Bayhan vd., 2018, s. 1). Bu tokenlar, DLT sistemi içindeki bir hizmete erişim elde etmek için kullanılabilir. Dolayısıyla hizmet tokenları, varlık tokenları için de değiştirilebilir. Bu token'lar için bir pazar ortaya çıkarsa, bu jetonlar itibari para veya kripto para birimleri için alınıp satılabilir (Sengul, 2020, s. 9).

3.3.2.2 Yönetişim

Sistem, bir çok kuruluşu içeren düzenlenmiş bir kurulumda konsorsiyum aracılığıyla yönetilir. Hem zincir içi hem de zincir dışı yönetişimin, konsorsiyum için tüm süreç ve normları tanımlaması beklenir. Konsorsiyumun düzenleyicinin spektrum paylaşımına ilişkin kurallarına dayalı olarak, zincir dışı süreçler ve sorumluluklar üzerinde anlaşmaya varması beklenmektedir (Sengul, 2020, s. 9).

Şekil 3.10

DLT Sisteminin Aktörleri UK Distributed Ledgers for Spectrum Authorization. Sengul, 2020, s. 10



Bu sistemi çalıştırmak için gerekli aktörler dört ana gruba ayrılır: yöneticiler, geliştiriciler, ağ geçitleri ve katılımcılar (Rauchs, 2019, s. 28). Şekil 3.10'da spektrum yetkilendirmesinde önemli bir rol oynaması beklenmeyen aktörler gri renktedir. Çekirdek DLT protokolünün geliştiricileri, sistemin kapı bekçileri, denetçiler ve kayıt üreticileri konsorsiyumun bir parçasıdır ve aynı renktedir. Konsorsiyum diğer aktörlere açık olabilir.

- **Yöneticiler:** Yöneticiler grubu, spektrum lisansı sahipleri, spektrum lisansı talep edenler ve ulusal düzenleyiciler gibi farklı kurum ve kuruluşları içerebilir. Bu kuruluşlar, düzenleyicinin spektrum varlıkları ihraççısı olarak hareket ettiği özel bir DLT konsorsiyumu oluşturur. Şebeke operatörleri gibi spektrum lisansı sahipleri borsa görevi görür. Düzenleyici, ağ erişimi, spektrum fiyatlandırması, rekabet, mahremiyet ve veri koruması için kurallar belirler (Matinmikko vd., 2018, s. 7). Düzenleyici, potansiyel konsorsiyum üyelerinin kimliğini doğrular ve varlık

tokenlarını borsalara aktarır. Düzenleyicilerin denetimler gerçekleştirmeleri ve piyasa eğilimlerini gözlemlemeleri beklenmektedir (Sengul, 2020, s. 10).

- **Geliştiriciler:** Başlangıçta DLT sistemi, ana protokol istemci yazılımları, uygulamalar ve harici sistemler dahil olmak üzere yoğun yazılım geliştirme süreçleri gerektirebilir (Sengul, 2020, s. 10). İstemci yazılımı ise; yazılımın, kişisel bilgisayarlara veya diğer cihazlara kurulmak üzere son kullanıcılara dağıtılması ve bu tür son kullanıcıların internet aracılığıyla sunucu yazılımına uzaktan erişmesini ve onunla etkileşimde bulunmasını sağlamak üzere tasarlanmış kısmı anlamına gelmektedir ("Client software definition: 630 samples," t.y.). Konsorsiyumun ana protokolü sürdürmesi ve sistemi güncel tutması beklenmektedir. Bu nedenle, özel bir konsorsiyum üyesi, diğer üyeler tarafından bağımsız olarak 'onaylanan' değişiklikler önererek geliştirici rolünü üstlenebilir. Diğer yazılımlar ve harici sistem geliştirme, konsorsiyumdan bağımsız olarak çalıştırılabilir (Sengul, 2020, s. 10).
- **Ağ Geçitleri:** Ağ geçidi, telekomünikasyonda kullanılan, farklı iletim protokollerine sahip iki ağı birbirine bağlayan bir ağ düğümüdür. Ağ geçitleri, tüm verilerin yönlendirilmeden önce ağ geçidinden geçmesi veya ağ geçidiyle iletişim kurması gerektiğinden dolayı, bir ağ için giriş ve çıkış noktası görevi görür ("What is a gateway? Definition from WhatIs.com," 2019). Konsorsiyum, kapalı sisteme erişimi yönetmek için bir kapı bekçisi atar. Kapı bekçisi, katılımcı cihazların doğrulanması ve bandın teknik kurallarına uygun olmayan bir cihaza çalışma izni verilmemesini sağlamak için kritik olabilir. DLT sistemi, harici sistemlerle iletişim kurmak için de ağ geçitlerine ihtiyaç duyar. Arazi ve algılama verilerini içeren spektrum ortamındaki statik ve dinamik girdiler, kayıt defteri dışında örneğin spektrum veri tabanları veya spektrum algılama ağları aracılığıyla üretilir ve tutulur. Bu harici sistemlerden gelen bilgiler, oracle'lar aracılığıyla deftere kaydedilebilir (Sengul, 2020, s. 10). Blok zincir oracle'ları, blok zincirleri harici sistemlere bağlayan ve böylece gerçek dünyadan alınan girdi ve çıktılara dayalı olarak akıllı sözleşmelerin yürütülmesini sağlayan varlıklardır ("What is an Oracle in blockchain? » explained," 2022).
- **Katılımcılar:** DLT sistemi, sistemin kendisini işlevsel ve güvenli tutmak için kayıt üreticilerine ve denetçilere ihtiyaç duyar. Konsorsiyum üyeleri bu rolleri doldurmalıdır. Diğer katılımcılar, kullanıcılara bir arayüz sağlayan ve hizmet sağlayıcılar tarafından işletilen hafif kullanıcıları içerir ve kullanılmayan spektrum aralıklarını güncellemelerine izin verir. DLT, aracıları ortadan kaldırmaya yardımcı olurken, aşağıdaki aktörlere de ihtiyaç duyulabilir. Bir işlem etkinleştirici, kaynakları

ve ihtiyaçları eşleştirmeye yardımcı olan akıllı sözleşmelerin keşfedilmesine ve kullanılmasına yardımcı olarak spektrum varlıklarına daha kolay erişim sağlayabilir. Bir grup yöneticisi, ticaret için bir spektrum bloğunu planlamaya ve paketlemeye yardımcı olabilir ve kullanıcılarının neden olduğu parazitleri araştırmak ve çözmek için ilk bağlantı noktası olarak hareket edebilir (Sengul, 2020, s. 10).

Şekil 3.11, DLT sistemindeki ana aktörleri ve önerilen sistemle etkileşimlerini göstermektedir. Şekil ayrıca, farklı konsorsiyum üyeleri tarafından dağıtılan akıllı sözleşmelerdeki işlevlerin (pseudo kod) örnek bir listesini de göstermektedir. Önerilen sistem, denetim ve girişim yönetimi için harici sistemlere erişebilmektedir. Akıllı sözleşmeler, uygun şartlarda token denilen varlık belirteçlerini dağıtmak ve spektrum ticareti yapabilmek için kullanılır. Akıllı sözleşmelerle birlikte dağıtılmış defter, kullanıcıları için aşağıdakileri sağlayabilir:

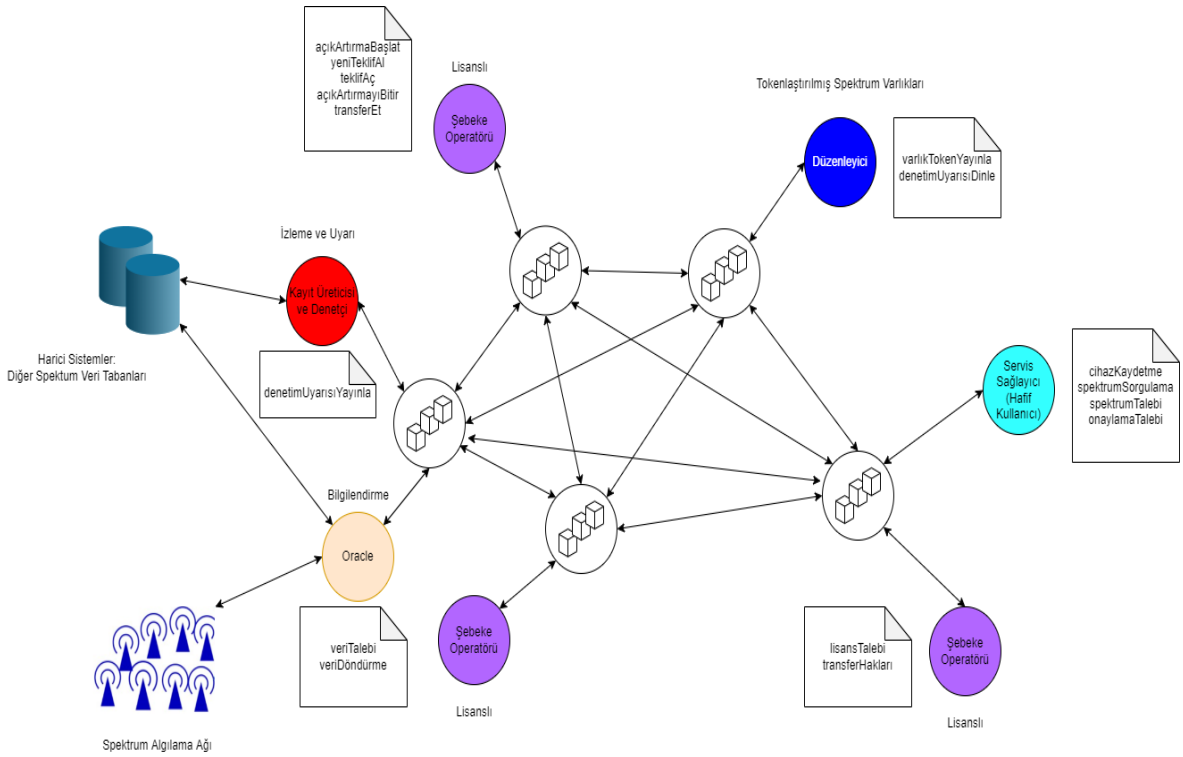
• **Kurumlar arası kayıt tutma ve şeffaflık:** Tüm konsorsiyum üyeleri, deftere ekleme yapmak, eklenen verileri doğrulamak ve denetlemek için kayıtlarını önerebilmelidir (Sengul, 2020, s. 11).

• **Spektrum ticareti ve paylaşımı için otomatik işlemler:** Borsalar ve hizmet sağlayıcılar, spektrum ticareti yapmak ve spektrum taleplerini vermek için farklı sözleşmeler uygulayabilir. Bir hizmet sağlayıcı sözleşmesi, cihazları kaydetme, spektrum sorgulamalarını alma ve spektrum kullanım hakkı tanımlama işlevlerini içerebilir. Bir spektrum değişimi, başka bir kullanıcıya zaman, coğrafya veya çıktı ile sınırlı aktarım hakları verebilir. Emisyonlar için zaman kanıtı ve konum, spektrum algılama ağları aracılığıyla toplanabilir. İşlemler ayrıca ödemenin doğrulanmasına veya cihazın iletim protokolleriyle uyumlu olmasına bağlı olabilir. Borsalar, kendi spektrumlarının ticareti için farklı modelleri destekleyebilir (örneğin, açık artırmaya dayalı) (Sengul, 2020, s. 11).

• **Kullanıcıların birlikte var olma optimizasyonu:** Bu, yerleşik lisans sahiplerini veya diğer kullanıcıları daha düşük önceliğe sahip giriş yapanların neden olduğu parazitlerden korumak (ve bazı durumlarda aynı önceliğe sahip kullanıcıları koordine etmek) için gereklidir. Emisyonların parazit üzerindeki etkisi analiz edilebilir, ancak böyle bir analizi DLT üzerinden çalışmanın uygun olmayabileceği değerlendirilmektedir. Zaman damgalı ve coğrafi kodlu gerekli bilgiler oracle'lar tarafından getirilebilir ve akıllı sözleşmelerin bir parçası olarak koruma algoritmaları çalıştırılabilir (Weiss vd., 2019, s. 11).

Şekil 3.11

DLT Sistemi İçindeki Farklı Aktörlerin Etkileşimi UK Distributed Ledgers for Spectrum Authorization. Sengul, 2020, s. 10



3.3.2.2 DLT Sisteminin Operasyonel Katmanları

Bir DLT sistemi üç operasyonel katmana ayrılabilir (Rauchs, 2019, s. 33). Protokol katmanı, sistemin nasıl çalıştığını tanımlar. Oluşum (genesis) ve değişiklik (alteration) olmak üzere iki ana bileşene sahiptir. Ağ katmanı ise iletişim, işlem işleme ve doğrulama dahil olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Veri katmanı, işlemlere ve günlük bileşenlerine bölünmüştür (Sengul, 2020, s. 11).

- **Protokol katmanı (Protocol Layer):** Genesis bileşeni, DLT sisteminin nasıl önyüklendiğini açıklar. Spektrum yetkilendirme sistemi kendi kendine yeterli olmalıdır ancak oracle'lar ve diğer ağ geçidi türleri aracılığıyla harici sistemlere arayüzler sağlamalıdır. Kod tabanının kapalı kaynak olması beklenir, ancak mevcut bir telif çerçevesine dayalı olarak geliştirilebilir. Konsorsiyum, ağın resmi kurallarını tanımlar ve DLT'yi yönetir. Alteration bileşeni protokol katmanının zamanla nasıl

geliştiğini açıklar. Temel protokol değişikliği teklifleri konsorsiyumdan geçer. Değişiklik önermek için birkaç model denenebilir. Seçmenlere, sistemdeki paylarına göre seçmenlerin azınlığına öncelik verilerek eşit veya farklı oy ağırlıkları verilebilir. Kod tabanının kapalı kaynaklı doğası göz önüne alındığında, Bitcoin'de görülen anarşik ve açık değişiklik konfigürasyonlarından kaçınılmalıdır ve en uygun olanı, resmi bir değişiklik yönetimi sürecini kullanan Verified.me tarafından desteklenen platformdur (Sengul, 2020, s. 11).

- **Ağ katmanı (Network Layer):** İletişim bileşeni, ağa nasıl erişildiğini ve verilerin ağ içinde nasıl yayıldığını açıklar. Ağ erişimi kısmen veya tamamen kısıtlanabilir, bu da yeni üyeler için bir kapı bekçisi gerektirir. Kısmen kısıtlı konfigürasyonda, olası katılımcıların başvurularına zincirleme oylama veya fikir birliği ile karar verilir. Konsorsiyum üyelerinin, işlemleri ve kayıtları alma, doğrulama ve yayınlama gibi gerekli işlevlerin tümünü veya bir alt kümesini gerçekleştiren tam düğümler olması beklenir. Katılımcıların işlem oluşturmasına izin vermek için hafif düğümler desteklenebilir, ancak kayıt doğrulama veya üretime katılamazlar. Müşterilere tam veya hafif bir düğüme bağlanabilmeleri için Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface – API) erişimi verilebilir (Sengul, 2020, s. 11). Kısaca API, belirli çalışma prensipleri ile geliştirilmiş uygulamaların, birbirleri ile iletişime geçerek çalışmasını mümkün kılan yazılımdır ("API Nedir?," 2021). Veri yayını için önerilen sistem, belirli işlemlerin küresel mutabakat gerektirdiği bir hibrit modeli desteklemektedir. Daha yüksek spektrumlu bir piyasa akışkanlığı elde etmek ve neredeyse gerçek zamanlı işlemlere hitap etmek için, işlem yapan tarafların özel devlet kanallarını oluşturmalarına ve yerel mutabakata güvenmelerine izin veren çok kanallı bir model de öngörülmektedir (Sengul, 2020, s. 11).

  Ağ katmanının işlem işleme bileşeni için; yalnızca bir düğüm alt kümesi, kayıt üreticileri olarak işlev görür. Sistemin, geçerli kayıtların rekabet eden veya çelişen sürümleriyle ilgili anlaşmazlıkları çözmek için gerekli olan bir fikir birliği algoritmasına karar vermesi gerekir (Sengul, 2020, s. 11).

  Söz konusu sistemin açık (örneğin Bitcoin) veya kapalı (Verified.me) olmasına bakılmaksızın, sistemi herhangi bir başka sistemde güvende tutmak için işlem doğrulaması gereklidir. Defter işlemleri, işlemlerin kaydedilmesi sırasında gecikmeye neden olabilir, ör. düğümler, işlemi deftere kaydetmek amacıyla aday olarak kabul etmek için bir bloğu doldurmaya yeterli istek beklediğinde blok gecikmesi nedeniyle bir fikir birliğine varılır. Ancak, geçici kayıtlar kısa bir süre

sonra sonuçlanmalıdır, aksi takdirde bu durum iletişim fırsatlarının kaçırılmasına ve müşteri gereksinimlerinin karşılanamamasına neden olacaktır. Bu nedenle, DLT'de gerçek zamana yakın işlemleri mümkün kılmak için ek yük ve gecikme arasında bir dengenin sağlanması gerekir. Verified.me tarafından kullanılan platform yine en uygun olanıdır, ancak kesin fikir birliği algoritması bilinmemektedir (Sengul, 2020, s. 11).

- **Veri katmanı (Data Layer):** Bu katman, veri girişini ve yürütme ortamını tanımlamaktadır. Öngörülen sistemin hem iç hem de dış kaynaklardan gelen verileri kabul etmesi gerekir. Ayrıca, çok kanallı model destekleniyorsa, bu özel DLT kanallarından gelen bazı verilerin de defterde olması gerekebilir. Günlük bileşeni, kayıtların deftere girmeden önceki durumunu tanımlar ve önerilen sistemde bunlar dahili, harici ve akıllı sözleşme ile ilgili verileri tutabilir. Spektrum ticareti ile ilgili anlaşmalar akıllı sözleşmeler olarak yürütülür. Akıllı sözleşme yürütmelerinin çoğu blok zincir üzerinde gerçekleşir, ancak ağır etkileşim hesaplamaları zincir dışı gerçekleştirilir ve oracles aracılığıyla DLT sistemine getirilir. Bu yapılandırma kararları, hibrit bir DLT'ye olan ihtiyacı yineler. Ticaretin meşruiyetini sağlamak için düzenleyici tarafından onaylanan kapalı bir spektrum alışverişi sistemine ihtiyaç vardır. Böyle bir yerleşik güven ile, DLT sistemini çalıştırmanın gecikme süresi, bant genişliği ve enerji maliyeti düşürülebilir ve maliyetli iş kanıtı konsensüs mekanizmalarından kaçınılabilir. Spektrum ticareti için, DLT sistemi, bağımsız taraflarca dağıtılan birden fazla sözleşme gerektirir ve durum bilgisi olan işlemlere ve veriler için içsel ve dışsal kaynaklara ihtiyaç duyması beklenir (Sengul, 2020, s. 11).

3.3.3 Blok Zincir Tabanlı Spektrum Paylaşımı Yaklaşımları

Geleneksel frekans tahsislerinin aksine spektrum paylaşımı yaklaşımları; spektrumu kullanma hakkı bulunan birden çok kullanıcıyı, erişim haklarını ve kullanım bilgilerini, veri tabanları kullanarak organize eden yönetim mekanizmaları olarak tanımlanabilir. Blok zincir teknolojisinin temelde bir veri tabanı yapısı olması, bu yapıyı spektrum paylaşımı biçimlerinin etkinliğini arttırıp arttıramayacağı konusunda araştırılmaya değer kılmaktadır.

Dağıtılmış defterler yani blok zincir mimarisi; mülkiyet haklarını ve varlıkları izlemek için merkezi veri tabanlarına kıyasla çeşitli avantajlar sunmaktadır. Örneğin

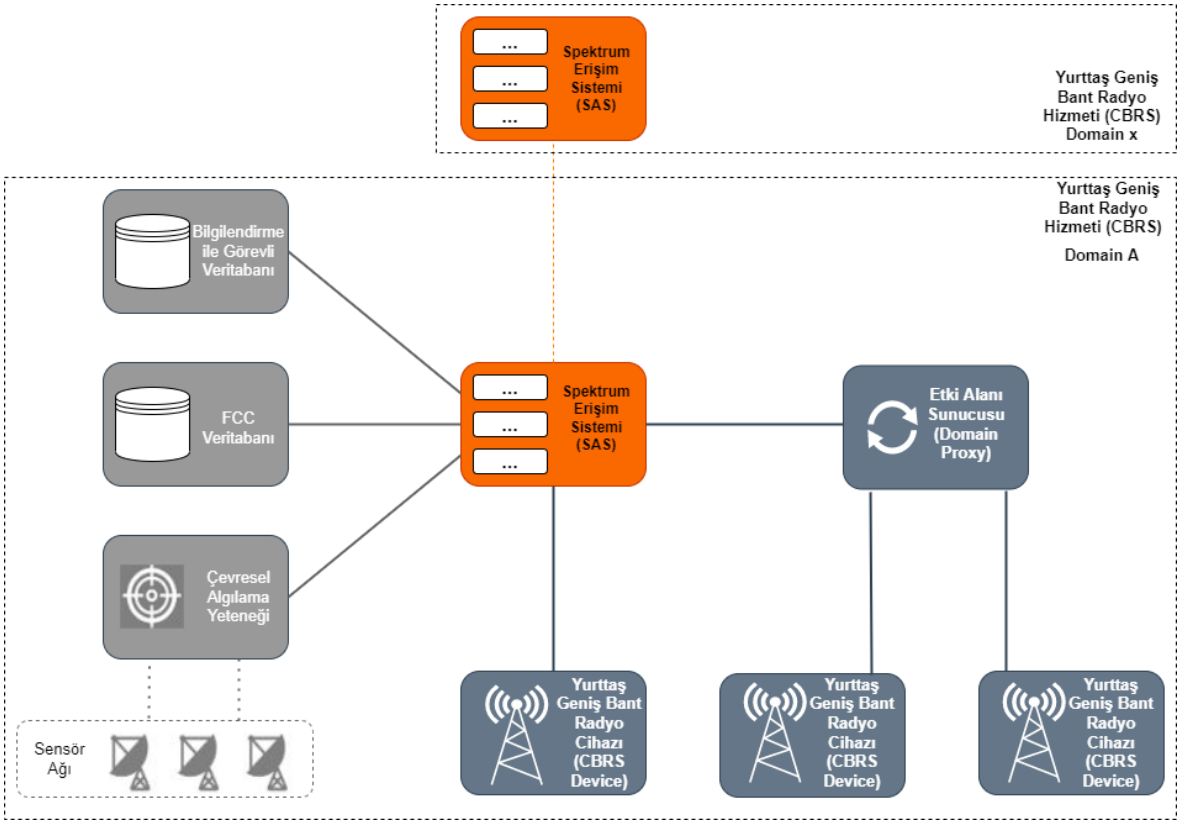
spektrum kullanımının kaydedilmesi konusunda belirli bir alandaki mevcut spektrum kaynakları ile alakalı bir düzenleyiciden gelen yetkilendirmenin, işlem gecikmesine maruz kalmadan hızlanacağı öngörülmektedir. Bu noktada paylaşım ve ticaret gibi spektrum yönetimi etkileşimlerinden faydalanmak isteyen spektrum kullanıcıları, hangi spektrum kaynaklarının kullanılabileceğine karar vermek için dağıtılmış defterin kendilerinde bulunan yerel kopyasından faydalanabilirler. Aynı zamanda, spektrum ücretlendirmesindeki adaleti sağlamak ve spektrum erişim verimliliğini değerlendirmek adına düzenleyiciler; dağıtılmış defterde yer alan bilgileri kullanabilirler. Bu avantajlara ek olarak; akıllı sözleşmelerin kullanılması ile spektrum kullanım ücretlerinin günün farklı saatlerine göre değiştirilmesi, spektrum kullanım ücretlerinin otomatik transferi ve kullanıcılar arasındaki ticari olanaklar etkinleştirilebilir.

3.3.3.1 Yrjöla'nın CBRS Hizmetinde Blok Zincir Kullanımı Yaklaşımı

Blok zincir tabanlı spektrum paylaşımı yaklaşımları için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin Yrjöla (2018) CBRS (Citizens Broadband Radio Service-Yurttaş Geniş Bant Radyo Hizmeti) olarak adlandırılan spektrum paylaşım ortamı için blok zinciri teknolojisinin kullanılabilirliğini incelemiştir (s. 128). Kablosuz servislerin ve cihazların artışı daha yüksek kablosuz bant genişliği, daha güvenilir ve eksiksiz kablosuz kapsama alanı için güçlü bir talep oluşmasına sebep olmaktadır. Tahsis edilmiş ancak yeterince kullanılmayan spektrumun dinamik paylaşımı, bu zorluğun üstesinden gelmek için geliştirilen yaklaşımlardan biridir. Bu sebeple Federal İletişim Komisyonu (FCC), 3550-3700 MHz frekans bandının verimli bir şekilde ortak kullanımına izin vermek için CBRS Hizmetini kurmuştur (FCC, 2015, s. 3-4).

Şekil 3.12

Yurttaş Geniş Bant Radyo Hizmeti (CBRS) Kontrol Mimarisi What is the Citizens Broadband Radio Service (CBRS)?. Metaswitch, t.y.



CBRS hizmeti, farklı kullanım öncellikleri olan üç farklı katmanlı lisans tipi içermektedir. ABD Savunma Bakanlığı radar sistemi bu bandın birincil lisanslı kullanıcısıdır. Banda erişebilen ikincil katmanlı lisans ise Türkçe'ye Öncelikli Erişim Lisansı olarak çevrilebilen PAL lisansıdır. Bu lisansa sahip olabilen kullanıcılar; şirketler, hastaneler, üniversiteler ve fabrikalardır. Üçüncül katmanda ise genel yetkili erişim lisansı (GAA) telefonlar, tabletler ve laptoplar gibi cihazların kullanımı için yer almaktadır ("What is CBRS? How it works & why your enterprise should care," 2022).

CBRS antenini veya anten dizisini destekleyen bileşen, Yurttaş Geniş Bant Radyo Servis Cihazı (CBSD- Citizens Broadband Radio Service Device) olarak adlandırılır. Her CBSD, bir Spektrum Erişim Sistemi'ne (SAS) kaydolur ve ardından spektrum talebini iletir. Talepte belirtilen parametreler, tahsis edilen radyo kanallarını (frekans aralığı) ve gerekli Etkin İzotropik Yayılan Gücü (EIRP) veya cihazın iletebileceği maksimum güç seviyesini içerir. CSBD ayrıca, dahili veya harici olarak konuşlandırılıp konuşlandırılmadığını, coğrafi konumunu, yüksekliğini ve antenin sabit uydu hizmeti (FSS) programı aracılığıyla FCC'ye

ilk olarak kaydedilmesi sırasında elde edilen benzersiz çağrı işaretini de tanımlamalıdır (Metaswitch, t.y.).

Merkezi bir SAS, CBRS'nin temel bileşenidir. SAS, FCC veri tabanlarına ve yerleşik raporlama sistemlerine bağlanır. SAS ayrıca Çevresel Algılama Yeteneği (ESC) sistemleriyle arayüz oluşturur. ESC sistemleri, bölgedeki radar kullanımını otomatik olarak algılar. Üç katman arasında paraziti önlemek için SAS, görevli erişim, öncelikli erişim ve genel erişim katmanları arasında erişime öncelik veren bir frekans koordinatörü görevi görür. Bu sistem, Amerikan Savunma Bakanlığı'ndan spektrum kullanımıyla ilgili önemli bilgileri aktaran ESC sistemi ile birlikte çalışabilmektedir ("What is CBRS? How it works & why your enterprise should care," 2022). Özetle SAS katmanlara göre atanan öncelik sırasını korurken, kullanıcılara dinamik olarak kanal atamaktan sorumludur.

CBRS sisteminin iki kritik bileşeni, SAS'lar arası iletişim ve dinamik kanal tahsisidir. Verimli bir spektrum paylaşım ortamı oluşturmak için, SAS yöneticileri gereken verileri paylaşmalı ve muhafaza etmelidir (Wireless Innovation Forum, 2017, s. 4). SAS verileri, izin verilen ESC bilgilerini, CBSD'lerin kurulum parametrelerini, CBSD'lerin birlikte var olma parametrelerini, CBSD alan kayıtlarını ve tüm aktif CBSD taleplerinin kayıtlarını içerir. Gelen çeşitli talepler arasında var olan birbirine bağımlılık durumu, hassas yerleşik bilgilerin gizliliğini korurken SAS'lar arasında gerçek zamanlı veri alışverişine ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır (Pappa vd., 2020, s. 632).

Ayrıca CBRS hizmeti, bir kullanıcının kanallarını geçici olarak diğer kullanıcılara kiralayabileceği spektrumun ikincil piyasa kiralamasına izin vermektedir. Bu bilgi, kanal tahsis kararları için hayati önem taşır ve genellikle uzun ve maliyetli sözleşme anlaşmalarının yönetimini gerektirir. Düzenleyici gereklilikleri karşılanırken, şeffaflık ile kısa vadeli spektrum işlemleri için bu tür sözleşmeleri sürdürmek zordur. Daha da önemlisi, çeşitli spektrum işlemlerini kaydedebilen ve çeşitli yasal prosedürler ve spektrum uygulama ihlallerinin yargılama sürecinde güvenilir kanıtlar sağlayabilen reddedilemez bir denetim günlüğü tutmanın zor olduğu değerlendirilmektedir (Malki & Weiss, 2016, s. 8).

Her CBSD, spektrum sorgulaması yapmalı ve ardından kanal üzerinde işlem yapmadan önce SAS'e bir kanal tahsisi talebinde bulunmalıdır. İstek sayısındaki artışla birlikte, gerçek zamanlı spektrum varlık transferi ciddi bir zorluktur. İlk şart, birbirine güvenmeyen kuruluşlar arasında koordinasyondur. İkincisi, çatışan çıkarları olan rakip organizasyonları içeren potansiyel olarak müdahale eden kanallar için eş zamanlı talepler olabilir. Bu tür taleplerin çakışmaması veya adil ve şeffaf bir şekilde çözülmesi gerekmektedir (Pappa vd., 2020, s. 632).

CBRS hizmetinde bahsedilen zorlukların blok zincir kullanılarak azaltılabileceği düşünülmektedir. Blok zincir teknolojisinin, dağıtılmış kanalların çakışmasını ortadan kaldırarak, kanalları dinamik, şeffaf ve adil bir şekilde tahsis edebileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca blok zincir, fikir birliği sağlayarak ve hassas bilgilerin gizliliğini koruyarak rakip, birbirlerine güvenmeyen kuruluşlara ait SAS'ler arasındaki iletişimi otomatikleştirmeye yardımcı olabilir (Pappa vd., 2020, s. 632).

Yrjöla'ya (2018) göre blok zincir teknolojisi; sözleşme, komisyonculuk ve veri alışverişinde işletmeler arası karmaşık ve çok adımlı iş akışlarının otomatikleştirilmesi yoluyla CBRS'deki işlem maliyetlerini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Blok zincir mimarisinde var olan konsensüs, değişmezlik ve kesinlik gibi özellikler sözleşmelerde gerekli olan müzakere ilkelerini kodlar ve kontrol eder. Bunlara ek olarak, blok zincir kullanılarak spektrum yönetimine getirilebilecek esneklik ve ölçeklenebilirlik, spektrum piyasasına giriş engelini azaltır ve yeni girenlerin özel iş ihtiyaçlarına göre yerel spektruma erişmelerini sağlayabilir (s. 130).

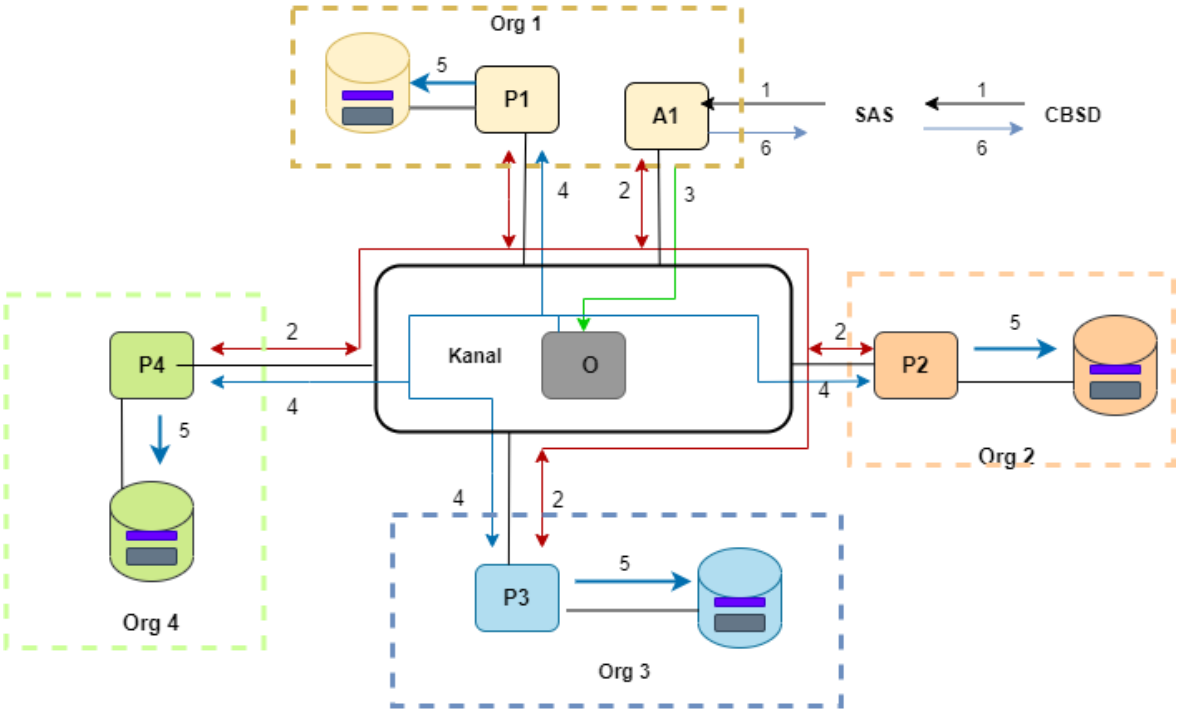
Blok zincirin idari bir spektrum yönetiminden, piyasaya dayalı bir spektrum yönetimine geçişe katkıda bulunabileceği değerlendirilmektedir. Yrjöla'nın analiz sonuçları kriptografik doğrulanabilirlik ile otomasyonun, herhangi bir paylaşım konsepti için temel tetikleyici olan kilit paydaşlar ve cihazlar arasında güveni oluşturduğunu ve artırdığını göstermektedir. Ancak analizin sonunda blok zincir teknolojilerinin spektrum paylaşımına başarılı bir şekilde konuşlandırılmasının, dinamik spektrum paylaşım kavramlarının verimliliğini önemli ölçüde artırma, spektrumun düzenleyici ve yönetim yaklaşımlarını etkileme ve yeni iş fırsatları yaratma potansiyeline sahip olduğu gibi, bu ihtiyaç duyulan dinamik yeteneklerin ve teknoloji olanaklarının oluşturulması ve doğrulanması için hükümet, endüstri ve akademiden ortak bir çaba gerektiği vurgulanmaktadır (Yrjölä, 2018, s. 137).

Yrjöla'nın analizi ışığında yapılmış bir başka çalışmada ise spektrum paylaşımının birbirinden farklı iki ana blok zincir ağı olan genel ve özel/izinli ağlardan hangisi üzerinde yapılması gerektiği tartışılmış olup, uygulamanın izin verilen bir blok zinciri ağı olan Hyperledger Fabric üzerinde geliştirilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir (Pappa vd., 2020, s. 633). Özetle; genel blok zincirleri, ortak anahtarları tarafından tanımlanan ağa katılmak isteyen herhangi bir kuruluşa açıktır. Bitcoin ağı, iyi bilinen bir halka açık blok zinciridir. Öte yandan, özel/izinli bir blok zinciri yalnızca yetkili kuruluşlara açıktır ve bir kuruluşun ağına katılabilmesi için genellikle bir davet/izin gerektirmektedir.

Hyperledger Fabric platformu üzerinde geliştirilmesi düşünülen bu çalışmanın temel sisteminde her kuruluş, ağı oluşturmak için bazı bilgi işlem kaynakları veya düğümleri tahsis etmektedir. Düğümlerin istemci, blok zincir eşi veya spektrum sipariş hizmeti düğümü gibi çeşitli rolleri vardır. İstemci düğümleri, SAS ve blok zinciri ağı arasındaki arayüzdür. Eş düğümler, blok zincirindeki işlemlerin işlenmesinden sorumludur. Her kuruluş, ağa birden fazla eş katkıda bulunur, bu da sağlamlık sağlar ve ayrıca onay adımını hızlandırır. Sipariş hizmeti, tüm katılımcı kuruluşlardan gelen düğümlerden oluşur ve işlemleri bloklar halinde düzenlemekten ve bunları tüm eş düğümlere göndermekten sorumludur. Tüm eş düğümler aynı blokları alır ve bu bloklardaki işlemleri sırayla yürütür. Sonunda tüm düğümlerde, ağın durumunun tutarlı bir görünümü vardır. Dağıtımda adil olunabilmesi için, tüm kuruluşlar çıkarlarının güvenli olduğundan emin olmak amacıyla eşit sayıda spektrum sipariş hizmeti düğümüne katkıda bulunur. Farklı kuruluşlardan SAS'lar, istemci düğümleri aracılığıyla ağa bağlanır. Bu istemci düğümleri, defterdeki bilgileri sorgulamak veya deftere veri yazmak/güncellemek için eş düğümlerle iletişim kurar (Pappa vd., 2020, s. 633). Sistem CBRS hizmetinde kullanılmak üzere tasarlandığından, CBRS için FCC (2017) tarafından açıklanan gereksinimlere dayalı olarak temel SAS veri tabanına kayıt ekleme, güncelleme ve silme gibi, CBRS ve SAS arası iletişim için birincil kuralları uygulamak maksatlı akıllı sözleşmeler geliştirilmiştir (s. 16).

Şekil 3.13

Blok Zincir Kullanılarak Oluşturulan CBRS Hizmeti Sistem Şeması Spectrum Sharing in CBRS Using Blockchain. Pappa vd., 2020, s. 636



P	Kullanıcı (Peer)		Defterde yer alan eski bloklar
O	İstenilen Kanal (Ordered)		Yeni işlemi içeren blok
A	İstemci Uygulaması (Client Application)		Yeni blok ile güncellenmiş defter

1	CBSD kayıt talebini SAS'e iletir. SAS bu talebi istemciye iletir.
2	İstemci işlem teklifini yapılandırır & teklifleri onaylayan yada geri gönderen eşlere iletir.
3	İstemci onaylanmış işlemi taahhüt için gönderir.
4	Talep edilen kanal için blokzincirdeki diğer tüm eşler engellenir.
5	Doğrulamadan sonra deftere yeni blok eklenir.
6	İstemci, başarıyı CBSD'yi bilgilendiren SAS'a bildirir.

Tasarlanan sistemde hiyerarşik bir kanal tasarımı kullanılarak bir kaynak için gelen isteklerin sayısı azaltılmıştır. Coğrafi konumlarına bağlı olarak, kullanıcıların alt grupları, ayrı kanallar tahsis edilerek bağımsız olarak ele alınmaktadır. Tüm eş düğümler, defterleri tutar. Ancak, farklı eşler, işledikleri kullanıcıların önceliğine bağlı olarak farklı defterlere erişebilir. Katılımcı kuruluşlar tarafından doğrulanacak veya SAS'lar tarafından erişilecek herhangi bir bilgi bu düğümlerde mevcuttur. Uygun izinlere sahip bir istemci düğümü, mevcut sistem durumunu eşlerden alabilir. Ancak mevcut sistem durumunu değiştirmek için bir işlem oluşturulur, gerekli talepler toplanır ve sipariş servisine gönderilir. Sipariş hizmeti, bu tür işlemlerin bir bloğunu çerçeveler ve bunları tüm eşlere iletir. Eşler, onaylarını kontrol ederek ve mevcut sistem durumuna göre giriş/okuma setini kontrol ederek her işlemi doğrular. Geçerli işlemler, eş düğümlerde tutulan deftere taahhüt edilir. Her bir eş, işlemi gerçekleştirmeden önce aynı defter durumuna sahip olduğundan ve gelen işlemleri aynı sırayla işlediğinden, yeni blok işlendikten sonra bile defter durumu tüm eşlerde aynı kalabilmektedir (Pappa vd., 2020, s. 634).Farklı akıllı sözleşmeler ile CBRS hizmeti için belirtilen kanal ve iletim gücü seviyesi gereksinimleri otomatikleştirilir ve kanallar dinamik olarak, öncelikli ve genel erişim kullanıcılarına atanır (Pappa vd., 2020, s. 634).

3.3.3.2 Blok Zincir Token Tabanlı Spektrum Ticareti Yaklaşımı

Lisanslanmış çok sayıda radyo spektrum bandının kullanım verimliliğinin düşük olması olması sorununa potansiyel çözüm adaylardan biri, dinamik spektrum erişimine (DSA) izin veren bilişsel radyo teknolojisidir (Akyildiz vd., 2006, s. 2128). DSA, yeni ikincil kullanıcıları (SU) fırsatçı bir şekilde yerleştirmek için hali hazırda lisanslı radyo spektrum bantlarında yeterince kullanılmayan kısımların yeniden tahsis edilmesini içerir. SU'lar, parazitsiz bir temelde lisanslı radyo spektrumundaki birincil kullanıcılarla (PU) bir arada bulunabilir. Geleceğin ikincil spektrum pazarlarının (SSM), karşılıklı olarak rekabet eden birincil lisanslı operatörler (PLO) tarafından lisanslı spektrum ve iletişim altyapısı paylaşımına büyük ölçüde bağımlı olduğu değerlendirilmektedir (Grønsund vd., 2013, s. 141). Bu noktada önemli olan ikincil spektrum pazarları işletilirken özellikli birincil kullanıcılar için yeterli hizmet kalitesinin sağlanmasıdır.

Bu başlık nakit dışı bir yaklaşıma dayalı ikincil bir spektrum ticaret modeli öneren Khan, Jamali, Maksymyuk ve Gazda'nın (2020) makalesinden esinlenerek oluşturulmuştur (s. 1). Bu yaklaşımın karasal yayıncılık bandına uyarlanarak; bilişsel radyo kullanılarak veya

kullanılmayarak, ikincil spektrum pazarı oluşturulmasına yönelik ışık tutabilecek nitelikte olduğu değerlendirilmektedir.

İkincil spektrum ticareti esnasında bir değer transferi olarak itibari para yerine sanal tokenlar kullanılabilir. Bu sanal token, spektrum token olarak adlandırılabilir. Spektrum token kullanımı, ikincil spektrum pazarını oluşturan kuruluşlar arasında bir metodoloji sağlar ve bankaları ya da herhangi bir üçüncü tarafın katılımını ortadan kaldırarak artan işlem maliyetlerinden kaçınmaya yardımcı olabilir. Bu varsayımda spektrum token diye adlandırılan varlık, blok zincir teknolojisinde ortaya çıkan herhangi bir tokenizasyon konseptinden farksızdır (Khan vd., 2020, s. 2). Varlıkların token haline getirilmesi bir ihraççının, dağıtık defter veya blok zincir üzerinde, maddi ya da maddi olmayan varlıkları temsil eden dijital varlıklar oluşturması işlemidir. Basit bir deyişle token haline getirme veya tokenizasyon işlemi; reel veya sanal hemen her varlığı dijitalize etmek demektir ("Varlıkların token Haline Getirilmesi," t.y.).

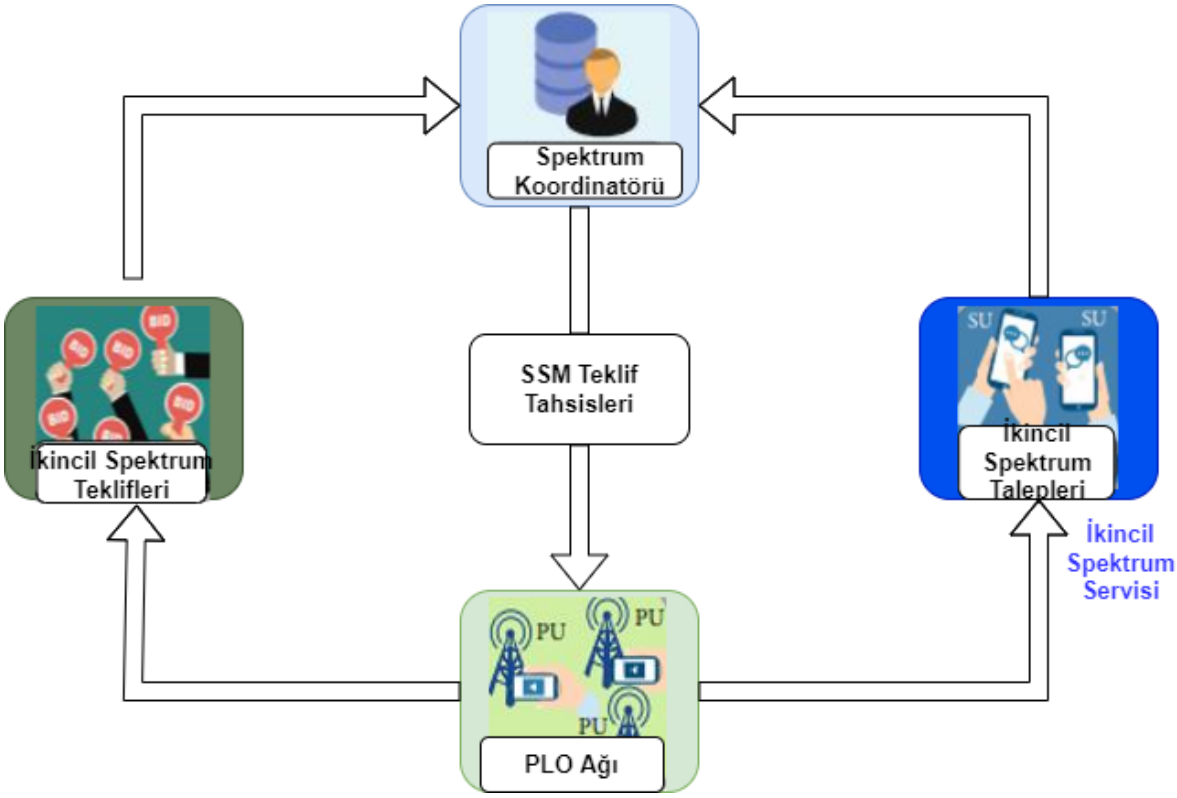
Khan, Jamali, Maksymyuk ve Gazda'nın (2020) spektrum token dijital varlığının yer aldığı ikincil spektrum pazarı yaklaşımına dair araştırmasında, sistemdeki sadeliği korumak adına spektrum koordinatörünün kar amacı gütmeyen bir varlık olduğu varsayılmaktadır. Temelde çalışmanın esas odağı spektrum tokenlarının rolünü ve takaslarını analiz etmektir (s. 2). Bu noktada diğer bir çok çalışmanın aksine merkezi mimariye sahip spektrum paylaşım şeması değerlendirilmiştir.

Genel olarak merkezi mimaride, spektrum aracısı, son kullanıcılardan gelen hizmet taleplerini birincil spektrum kullanıcılarının spektrum teklifleriyle eşleştirmekten sorumludur. Bu şekilde işleyen bir sistemde son kullanıcılar ve birincil spektrum kullanıcıları arasında herhangi bir iletişim gerekliliği yoktur. Bu yüzden sistem, iletişim yükünün azaltılmış olmasının avantajlarını sunar. Bunlara rağmen; merkezi mimari potansiyel olarak tek bir başarısızlık noktasından zarar görebilir ve bu da varsayılan hizmetin verimliliğinin düşmesine neden olabilir (Khan vd., 2020, s. 2). Bu noktada Cronin, Kurc, Filstrup ve Jamin'in (2004) yansıtılmış sunucu mimarisi önerisi gibi çeşitli çözümler mevcuttur (s. 1).

Şekil 3.14

Merkezi Bir Spektrum Koordinatörü Tarafından Yönetilen İkincil Radyo Spektrum Ticareti

A blockchain token-based trading model for secondary spectrum markets in future generation mobile networks. Khan vd., 2020, s. 3



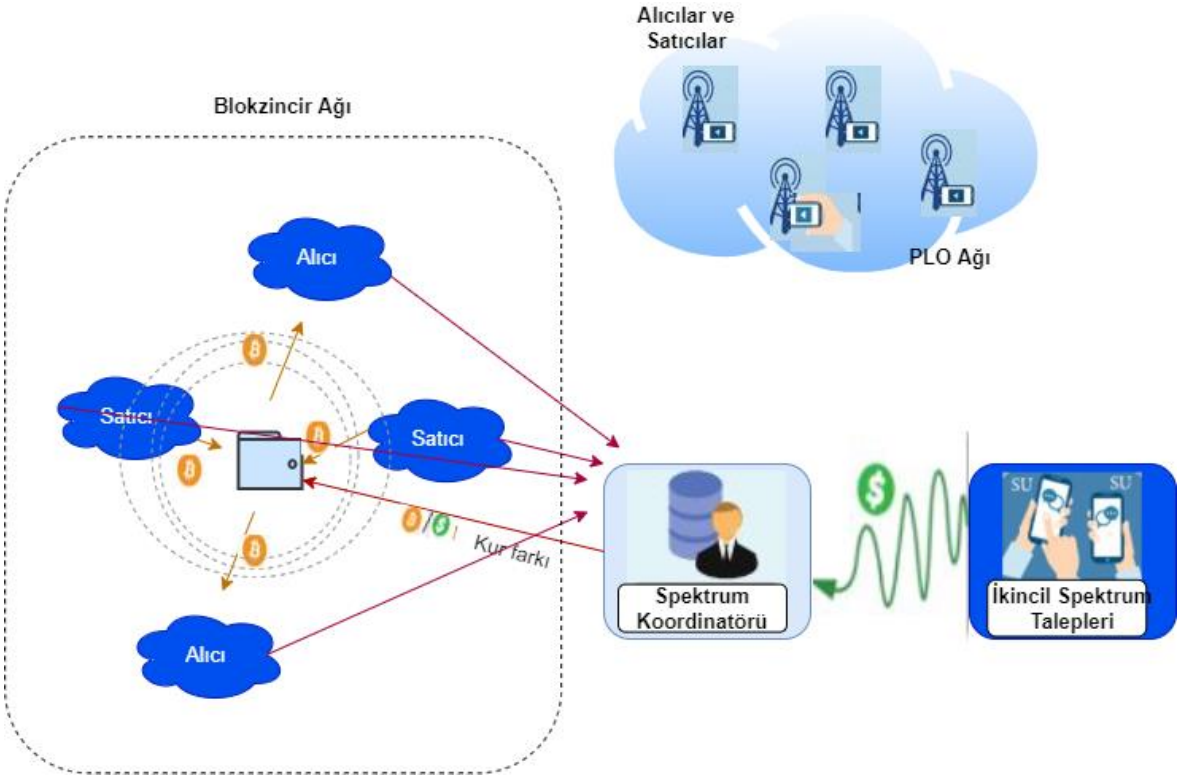
Şekil 3.14'te merkezi bir spektrum koordinatörü tarafından yönetilen ikincil radyo spektrum ticaret modelinin senaryosu sunulmaktadır. Birincil spektrum kullanıcıları paylaşmak istedikleri frekans bandına dair bilgileri ve bunlara karşılık gelen fiyatları belirterek kapalı tekliflerini verirler. İncelenen bu çalışmada, spektrum açık artırma süreci, kapalı teklif spektrum açık artırması olarak modellenmiştir. Spektrum koordinatörü ise açık artırma süreçlerini yöneten ve teklif tahsislerini yapmaktan sorumlu olan taraftır. Arz ve talebe dayalı olarak, birincil spektrum kullanıcıları spektrum paylaşım sistemindeki son kullanıcılara hizmet sağlamak ve bundan bir gelir elde etmek maksatlı spektrumlarını takas ederler.

Bu sistemde önerilen takas modeli ise en yüksek katkıyı sağlayan birincil spektrum kullanıcılarının kar paylarını maksimize ederken, en düşük düzeyde katılım sağlayanların da zararlarını maksimize etmeye olanak sağlayan taban ve ticaret kuralıdır. Böylece birincil

spektrum kullanıcılarının sistemde aktif olması teşvik edilerek spektrum kullanımında verimlilik düzeyi arttırılmış olur (Khan vd., 2020, s. 4).

Şekil 3.15

USD ve Spektrum Dolar İşlem Akışları ile Önerilen İkincil Spektrum Piyasası Blok Diyagramı A blockchain token-based trading model for secondary spectrum markets in future generation mobile networks. Khan vd., 2020, s. 4



Taban değeri katılımcı birincil spektrum kullanıcıları arasında değiş tokuş edilen toplam para miktarına dayalı olarak, spektrum token cinsinden katılım ücretini belirleyen negatif olmayan bir sayıdır. Taban değeri aynı zamanda spektrum tokenını fiyatlandırmak ve radyo spektrumunun yeniden kullanımını sağlamak maksatlı katılımcı birincil lisanslı kullanıcılar için karşılık gelen kar-zarar paylarını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bahsi geçen spektrum tokenının ticaret boyunca katılımcı birincil lisanslı kullanıcılar arasında değiş tokuş edilmesi önerilmiştir. Katılımcı kullanıcılar tarafından değiştirilecek spektrum tokenlarının sayısı, arz-talep dengesi ilkesini kullanarak spektrum tokenlarının itibari para cinsinden fiyatını belirlemek için kullanılır (Khan vd., 2020, s.).

Özetle; spektrum token fiyatı, spektrum token satıcılarının sayısındaki azalmayla veya spektrum token alıcılarının sayısındaki artışla artar ve bunun tersi de geçerlidir. Taban ve ticaret kuralına dayalı metodoloji, en fazla katkıda bulunanlar için ödülü en üst düzeye çıkarmakta ve aynı zamanda radyo spektrumunun yeniden kullanımını sağlamak için en küçük katkılarda bulunanlar için kaybı en üst düzeye çıkarmaktadır. Böylece, spektrumun birincil kullanıcıları ikincil spektrum ticaretinin ekonomik parametrelerini manipüle edemez ve bu nedenle ikincil spektrum kaynağı üzerinde bir tekel kurma şansı ortadan kalkmış olur (Khan vd., 2020, s. 10).

3.3.4 Blok Zincir ile Spektrum Paylaşımına Dair Tartışmalar

Blok zincir teknolojisi, her ne kadar popüler bir veri tabanı mimarisi olsa da her senaryo için en iyi çözüm değildir. Eldeki uygulama için blok zincirinin kullanışlılığını değerlendirmenin ilk adımı uygulamanın; ademi merkeziyetçilik, şeffaflık, değişmezlik, kullanılabilirlik ve güvenlik gibi blok zincirin temel özelliklerine ne düzeyde ihtiyacı olduğunu sorgulamaktır. Örneğin, ilgili tüm veriler tek bir güvenilir tarafın kontrolü altında kalacaksa, merkezi olmayan bir çözüme gerek yoktur (Weiss vd., 2019, s. 194).

Önerilen herhangi bir blok zinciri kullanım durumu için temelde iki kritik soru bulunmaktadır: Çözülmesi gereken sorun nedir ve blok zinciri neden mevcut veri tabanı teknolojilerinden üstündür? Spektrum paylaşımı konseptinde, blok zincirin genel özelliklerinin mevcut rejimlerin sınırlamalarını ele alabilecekleri bir dizi işlev vardır. Blok zincir yaklaşımları hem ticari hem de teknik faydalar vaat etmektedir. Bununla birlikte, her biri farklı avantajlar ve dezavantajlar sunan genel (halka açık) ve izin verilen blok zincirler arasında daha fazla ayrım yapılması gerekmektedir (Weiss vd., 2019, s. 195).

Tablo 3.1

Genel ve İzinli Blok Zincirlerinin Spektrum Paylaşımı İçin Faydaları ve Sınırlamaları

	Teknik Faydalar	***İş Faydaları***	***Sınırlamalar***
Genel Blok Zinciri	•Spektrum yönetimi ve denetimi için şeffaf bir defter sağlar. •Veri tabanları için güçlü güvenlik ve yüksek kullanılabilirlik sağlar. •Akıllı sözleşmeler, karmaşık paylaşım düzenlemelerine olanak tanır.	•Ademi merkeziyetçilik sağlar. •Kullanıcılar veriler üzerinde kontrolü elinde tutabilir •Kripto para birimleri maliyete dayalı faaliyetleri teşvik edebilir.	•Konsensüs protokollerinin ek yükü sistemleri zorlayabilir. •Yönetişim belirsizdir. •Anonimlik, uygulama zorluklarına yol açabilir.
İzinli Blok Zinciri	•Spektrum yönetimi ve denetimi için şeffaf bir defter sağlar. •Yüksek verimi destekleyebilir. •Veri tabanları için güçlü güvenlik ve yüksek kullanılabilirlik sağlar. •Akıllı sözleşmeler, karmaşık paylaşım düzenlemelerine olanak tanır.	•Kontrolü uygulayabilecek merkezi bir veri tabanı operatörü yoktur. •Kullanıcılar veriler üzerinde kontrolü elinde tutabilir.	•Geleneksel veri tabanlarına göre faydaları net olarak bilinmemektedir. • Yönetişim, rakipler arasında bir soruna sebep olabilir.

On the application of blockchains to spectrum management. Weiss vd., 2019, s. 197

Tablo 3.1'de, spektrum paylaşımı için genel ve izinli blok zincir tabanlı yaklaşımların bir karşılaştırması yapılmıştır. Tablonun amacı, blok zincirleri spektrum paylaşım sistemlerine dahil etmenin başlıca fırsatlarını ve sınırlamalarını vurgulamaktır.

Tablo 3.2

Spektrum Paylaşımının Birincil Ve İkincil Lisanslı Olmak Üzere Farklı Modları

	İşbirliksiz	**İşbirlikli**
Birincil	Lisanssız	İkincil Market
İkincil	Fırsatçı	İşbirlikçi Paylaşım

On the application of blockchains to spectrum management. Weiss vd., 2019, s. 197

Tablo 3.2'de spektrum paylaşımının birincil ve ikincil lisanslı olmak üzere farklı modları gösterilmiştir. Tablo 3.2'de geçen "birincil paylaşım" terimi, tüm kullanıcıların spektruma erişim için eşdeğer haklara sahip olduğu anlamına gelmektedir. Buna karşılık, ikincil paylaşım rejimi, yerleşiklerin/birincil kullanıcıların/lisans sahiplerinin, spektruma girenler/ikincil kullanıcılar için üstün haklara sahip olduğu bir haklar hiyerarşisi anlamına gelmektedir (Weiss vd., 2019, s. 196).

Spektrum paylaşımındaki araştırmaların çoğu, ikincil bir paylaşım rejimini varsaymaktadır. Örneğin bu tezde yer alan CBRS ve LSA konseptleri buna örnektir. Tabloda "işbirlikçi" paylaşım, paylaşım yapan taraflar arasında paylaşıma ilişkin ön anlaşmalar yapıldığı anlamına gelmektedir (Weiss vd., 2019, s. 196-197). Aşağıda tablodaki farklı spektrum paylaşım modları sırayla incelenmiştir.

3.3.4.1 Birincil İşbirlikçi Paylaşım

Birincil, işbirlikçi paylaşımda, kullanıcılar kullanımlarını önceden koordine etmektedirler. Henüz varsayımsal olarak incelenen gerçek zamanlı spektrum piyasaları buna örnek olabilir (Caicedo & Weiss, 2010, s. 46). Bu tür bir paylaşımda spektrum kullanıcıları ihtiyaçlarına uygun aktarım fırsatlarını bulabilmeli ve kullanım haklarını hızlı bir şekilde değiş tokuş edebilmelidirler (Weiss vd., 2019, s. 5-6).

Gerçek zamanlı bir spektrum ticareti piyasası için, blok zinciri, spektrum isteklerini ve tekliflerini kaydeden, iletim haklarının değişimini gerçekleştiren işlemleri merkezsizleştirir. Bu senaryoda, spektrum istekleri ve teklifleri blok zincir veri tabanı üzerinde kaydedilebilir ve akıllı sözleşmeler kullanılarak iletim haklarının değişimi gerçekleştirilebilir. Bu noktada blok zincir mimarisine ek olarak akıllı sözleşmelerinde devreye girmesi çok çeşitli spektrum paylaşım ilişkileri sağlayabilir. Örneğin bir akıllı

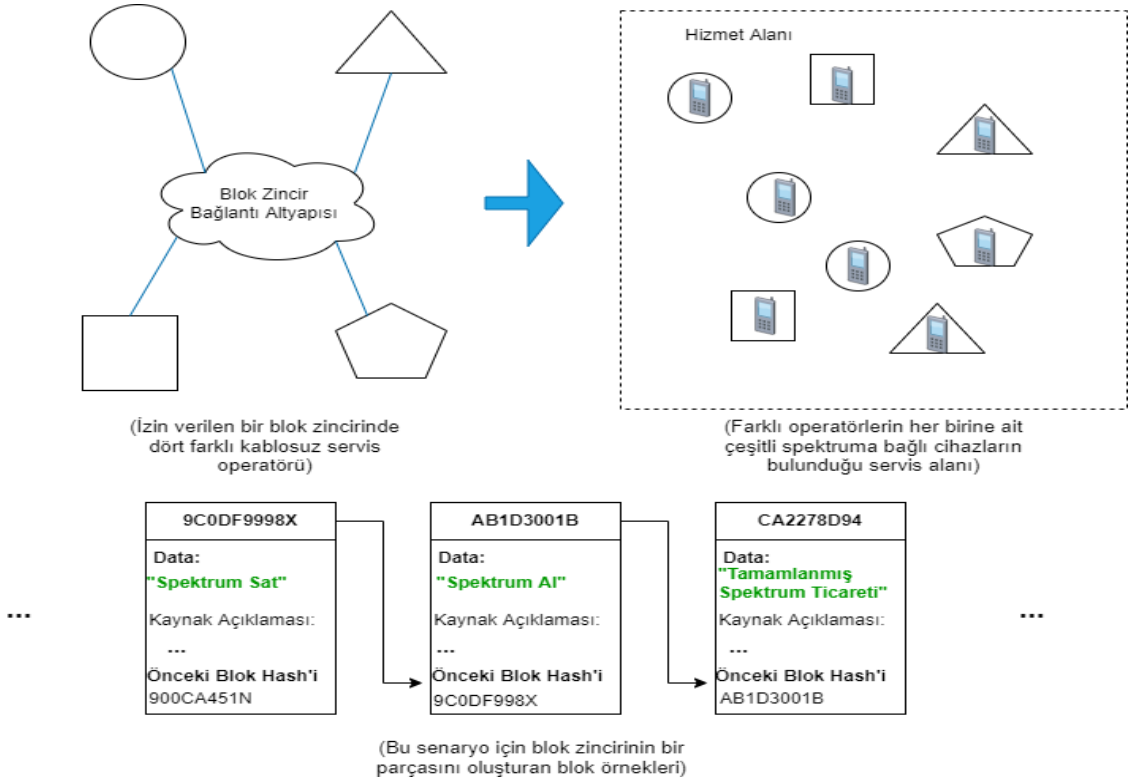
sözleşme, zamanla sınırlı bir spektrum kullanım ticareti yani spektrumu süreli olarak kiralama işlemi gerçekleştirebilir. Farklı bir akıllı sözleşme ise, zaman, coğrafya, iletim özellikleri gibi sınırlamalar kullanarak başka bir kullanıcıya iletim hakkı tanıyan bir spektrum hak sahibinin işlemlerini gerçekleştirebilir. Ve bu tip işlemler, ödemenin doğrulanmasına veya cihazların iletim protokolleri vb. ile uyumlu olduğunun doğrulanmasına bağlı olabilir (Weiss vd., 2019, s. 5).

Akıllı sözleşmelerin esnekliğine ve otomasyonuna ek olarak, birincil işbirlikçi spektrum paylaşımı için blok zincirler şeffaf, denetlenebilir, birleşik bir işlem kaydı sağlayabilir. Blok zincir ile her bir taraf kendi verilerini kontrol eder, ancak herkes tüm defteri görebilir. Defterin şeffaf olduğunu varsayarsak, piyasa katılımcıları ve düzenleyiciler, denetimler gerçekleştirebilir ve piyasa eğilimlerini gözlemleyebilir. Düzenleyiciler ayrıca bir finansman mekanizması olarak işlemleri vergilendirmek için blok zincirini kullanabilir. İşlemler rekabet açısından stratejik olarak kabul edilirse, izin verilen bir defter şeffaf olmayabilir veya yalnızca düzenleyici tarafından görüntülenebilir (Weiss vd., 2019, s. 5).

Şekil 3.16'de birincil işbirlikçi spektrum paylaşımı için blok zincirini oluşturan veri bloklarının yapısının basitleştirilmiş bir örneği gösterilmiştir. Her blok, tek bir "spektrum sat", "spektrum al" teklifi ya da "tamamlanmış bir spektrum ticaretinin" verilerini içerebilir. Blok zincir yapısının genel özelliği olarak, her blok kendisiyle ilişkilendirilmiş bir şifreleme karma değerine sahip olacaktır. Bilindiği üzere bu karma değeri, blok zincirinde başka bir bağlantı oluşturmak için mevcut bloğa dahil edilen önceki bloğun karma değeri de dahil olmak üzere bloktaki bilgilerin değiştirilmesini önlemektedir.

Şekil 3.16

Birincil İşbirlikçi Spektrum Paylaşımı İçin Blok Zinciri On the application of blockchains to spectrum management. Weiss vd., 2019, s. 6



3.3.4.2 İkincil İşbirlikçi Paylaşım

İkincil işbirlikçi spektrum paylaşımın birincile göre temel farkı, ikincil veya daha düşük seviyeli spektrum kullanıcılarının, birincil kullanıcılara müdahale etmemek ve böylelikle haklarını korumak amacıyla veri tabanını sorgulamaları gerekliliğidir. Bu durum ikincil işbirlikçi paylaşım ortamında, daha fazla işlem çeşitliliğinin oluşmasına sebep olacaktır. Bunun dışında yer alan blok zincir ve akıllı sözleşmelerin kullanımı konusunda birincil işbirlikçi spektrum paylaşımında yer alan tartışmalar, ikincil işbirlikçi spektrum paylaşımı için de geçerlidir (Weiss vd., 2019, s. 6).

3.3.4.3 İkincil İşbirlikçi Olmayan Paylaşım

İkincil işbirlikçi olmayan spektrum paylaşımı, ikincil kullanıcıların kullanımlarını birincil kullanıcılarla önceden koordine etmediği durumları ifade etmektedir. İkincil işbirlikçi olmayan paylaşıma en iyi örnek ise bilişsel radyolarda kullanılan spektruma fırsatçı

erişim durumudur. Bilişsel radyoların spektruma fırsatçı erişiminin temelinde; iletimin mümkün olduğu yerin yani spektrum aralığının belirlenmesi, aynı bandı kullanan diğer fırsatçı kullanıcıların belirlenmesi ve iletimin mümkün olmadığı zamanı algılama gibi faktörler yatmaktadır. Blok zincir kullanımı bu spektrum paylaşım modelinde geçmiş erişim verilerinin saklanması dolayısıyla, spektruma fırsatçı olarak erişmek isteyen cihazların iletim fırsatlarını belirleme ve değerlendirme yeteneklerini geliştirmek konusunda katkı sağlayabilir. İkincil cihazların birincil kullanıcılara müdahale etme yeteneğini sınırlamak için akıllı sözleşmeler; birincil kullanıcılar müdahaleye maruz kalırsa, ihlalleri değerlendirmek ve hatta akıllı sözleşmeler yoluyla cezalar uygulamak için ikincil cihazların faaliyetlerini kaydeden blok zinciri tabanlı bir defter kullanılabilir (Weiss vd., 2019, s. 7-8).

3.3.4.4 Birincil İşbirlikçi Olmayan Paylaşım

Bu tür paylaşımlarda, kullanıcılar spektrum kullanımlarını önceden koordine etmezler ve kullanıcıların hepsi spektrum paylaşımı noktasında eşit önceliğe sahiptirler. Bu tür paylaşımın en basit örneği, lisanssız ISM (industrial, scientific, and medical) bantları tarafından tanımlanan açık erişim spektrum paylaşımı olacaktır. ISM bantları ise özetle, adından da anlaşılacağı gibi bilimsel, tıbbi ve endüstriyel cihazlar tarafından genel kullanım için ayrılmış radyo spektrumunun parçalarıdır ("ISM bands around the world," 2022).

Birincil işbirlikçi olmayan spektrum paylaşım ortamında kullanıcıların kaydını tutan bir blok zinciri kullanmanın spektrumun verimli kullanımını sağlama, kullanıcıların kimliğini kaydetme ve buna göre spektruma erişim izinlerini kontrol etme ve spektrumun anlık kullanımını gösteren bir harita oluşturabilme gibi faydaları olabilir. Ancak blok zincir kullanımının bu noktada giderleri artırabileceği ve kullanıcılara blok zincire katılmaları için teşvikler yapılması gerektiği hususları, dezavantajlar olarak sayılabilmektedir (Weiss vd., 2019, s. 9).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tezin bu bölümünde çalışmadan elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Ardından bu değerlendirmelerden yola çıkılarak RTÜK için uygulanabilir olanlar öneriler başlığı altında madde madde sıralanmıştır.

Sonuçlar

Kablosuz iletişimde bilgi elektromanyetik dalgalarla aktarılmaktadır. Bilim insanları, genellikle yayılma özelliklerine göre sınıflara ayrılan elektromanyetik radyasyon frekanslarının tüm aralığını belirtmek için "elektromanyetik spektrum" ifadesini kullanır. Radyo spektrumu, elektromanyetik spektrumun en düşük frekansa ve en uzun dalga boyuna sahip radyasyonla karakterize edilen kısmıdır. Geleneksel olarak, radyo dalgalarının frekansı 3 kHz ile 3000 GHz arasında değişmektedir.

Elektromanyetik spektrum tükenmeyen, depolonamayan, kıt bir kaynaktır. Elektromanyetik spektrum, farklı bantları farklı özellikler gösterdiğinden homojen değildir. Ayrıca, aynı veya bitişik frekanslarda aynı anda ve aynı yerde iletilen sinyaller birbiriyle etkileşime girebileceğinden, tıkanıklığa tabidir. Farklı kaynaklardan gelen ve farklı bilgiler içeren sinyallarin birbirleriyle etkileşime girmesi elektromanyetik girişim ya da enterferans olarak tanımlanmaktadır. Enterferans, spektrumun kullanılabilirliğini azaltan veya geçersiz kılan önemli bir sorunu temsil etmektedir.

Tamamen teknik bir bakış açısından, radyo spektrumu, herkesin kullanabileceği sınırsız kapasiteye sahip bir kamu kaynağı olarak düşünülebilir. Ancak, farklı radyo sistemleri keyfi olarak aynı spektrum bandını kullanıyorsa, istenmeyen ve zararlı sinyal girişimine neden oluyorsa, radyo dalgaları beklenen hizmeti sağlayamaz. Bu durum, kablosuz hizmetlerin dağıtımının en başından beri, radyo spektrumunun evrensel ortak kullanımına izin vererek zararlı parazitleri önlemek amacıyla spektrum yönetiminin ortaya çıkmasının nedenidir.

Ayrıca, bir ülkedeki sistemler için kullanılan radyo dalgaları yayılımları ulusal sınırlarla kısıtlı değildir. Radyo dalgaları sınırları tanımaz, bu nedenle sınırları geçebilir ve istenmeyen parazitlere neden olabilir. Bu durumda, her bir operatör tarafından hizmetlerin etkin bir şekilde sunulmasını engelleyecek kısıtlamalar yaratmadan farklı hizmetlerin spektruma adil erişimini sağlamak için ülke içinde de koordinasyon gereklidir.

Radyo ve televizyon yayıncılığında, yayını izleyiciye ulaştırmak amacıyla karasal, uydu ve kablo olmak üzere üç ortam kullanılmaktadır. Karasal ortam 6112 sayılı Kanunun "Tanımlar" başlıklı üçüncü maddesinde "yayın hizmetinin karasal verici sistemleri vasıtasıyla alıcılara iletildiği ortam" olarak tanımlanmakta olup, yayıncılığın başlangıcından itibaren kullanılması sebebiyle en bilinen yayıncılık yöntemi olduğu söylenebilir.

6112 sayılı Kanununun "Kuruluş" başlıklı 34'üncü maddesinde "(1) Radyo, televizyon ve isteğe bağlı yayın hizmetleri sektörünü düzenlemek ve denetlemek amacıyla, idarî ve malî özerkliğe sahip, tarafsız bir kamu tüzel kişiliği niteliğinde Radyo ve Televizyon Üst Kurulu kurulmuştur." hükmü yer almaktadır. Ayrıca, Elektronik Haberleşme Kanununun 36'ncı maddesi kapsamında RTÜK'e tahsis edilen yayıncılık spektrumunun yönetimine ilişkin olarak 6112 sayılı Kanun ile televizyon kanal ve radyo frekans planlama yetkisi RTÜK'e verilmiştir. Bu kapsamda frekans spektrumunda yer alan 87.5-108.0 MHz frekans aralıkları FM analog radyo, VHF III (174-230 MHz) karasal sayısal radyo (T-DAB ve DVB-T) ve VHF III (174-216 MHz), UHF IV/V (470-694 MHz) bantları karasal sayısal televizyon yayınları (DVB-T2) için olmak üzere RTÜK iznine tabidir.

ITU Bölge 1'de 470-862 MHz'deki UHF bandı tarihsel olarak analog televizyona tahsis edilmiştir ancak WRC-07'de 790-862 MHz'deki UHF bandının üst kısmı 2015'ten itibaren olmak üzere, Bölge 1'de mobil servislerin kullanımına açılmıştır. WRC-12'de ise ITU Bölge-1'de 694-790 MHz (700 MHz) frekans bandı Çözüm Kararı 760'ta belirtilen hükümlere uymak şartı ile hava mobil hariç mobil servisler için tahsis edilmiştir.

WRC-19 Konferansında, 2023 yılında düzenlenecek olan WRC-23 ülkemizin de içinde bulunduğu Bölge-1 (Region-1) için WRC-15'te alınan Çözüm Kararı 235 kapsamında 470-694 MHz bandına ilişkin olası düzenleyici önlemlerin de dikkate alınması suretiyle, 470-960 MHz bandındaki servislerin mevcut spektrum kullanımlarının ve spektrum ihtiyaçlarının incelenmesine karar verilmiştir. Ülkemizde hâlihazırda analog karasal televizyon yayıncılığı için kullanılmakla birlikte sayısal karasal televizyon yayıncılığında da kullanılacak olan 470-694 MHz frekans bandının da içinde yer aldığı 470-960 MHz frekans bandı ile ilgili olarak alınacak kararlar, karasal televizyon yayıncılığı için büyük önem taşımaktadır.

2023 yılında gerçekleştirilecek WRC'de, Gündem Maddesi 1.5 kapsamında ülkemizde karasal yayıncılık için kullanılan 470-694 MHz bandına ilişkin hususlar görüşülecektir. Bilindiği üzere WRC-2019 ile birlikte hâlihazırda karasal televizyon yayıncılığında kullanılmakta olan 470-694 MHz frekans aralığının IMT servisi için

değerlendirilmesi hususu bir sonraki toplantı olan WRC-2023'ün gündem maddeleri arasına girmiştir.

Bu tezin Spektrum Yönetiminin Amaç ve Hedefleri Başlıklı birinci bölümününün 1.5 Sayısal Pay (Digital Dividend) alt başlığında yer alan sayısal pay, karasal televizyon yayınlarının analogdan sayısala geçişiyle serbest kalan spektrum miktarı, yani VHF ve UHF bantlarındaki mevcut analog televizyon hizmetlerini sayısal biçimde barındırmak için nominal olarak gerekli olanın üzerindeki spektrum miktarı, olarak tanımlanmaktadır. Bu hususta WRC toplantılarında alınan son kararlardan görülebileceği üzere RTÜK iznine tabi olan spektrumun bir kısmı, sayısal yayıncılığa geçildiği varsayılarak farklı hizmetlere tahsis edilmektedir.

Sayısal pay spektrumunun açılabileceği yenilikçi kullanım yelpazesi geniştir ve gelecekte daha da büyüyebileceği düşünülmektedir. OFCOM'a (2007) göre, ICT sektörünü karakterize eden hızlı değişimler göz önüne alındığında, yeni teknolojiler ve hizmetler ile mevcut teknolojiler için yeni kullanımlar ortaya çıkabilir ve bu da sayısal pay spektrumunun kullanılmasını gerektirebilir (s. 30).

OFCOM tarafından paylaşılan bir başka çalışmaya göre ise resmi olarak atandıkları gün itibariyle birçok frekansın boş olduğu kaydedilmiştir (Guide to the Spectrum Framework Review, 2005, s. 14). Bu durum politika yapıcı ve düzenleyicilerin dikkatini spektrumun daha verimli kullanımını sağlamak amaçlı, hizmetlerin ve yenilikçi teknolojilerin iyileştirilmesine yol açan istikrarlı esneklik ve maliyetler dengesine daha fazla vurgu yapan spektrum düzenlemesi yaklaşımlarına çekmektedir.

Dinamik spektrum erişimi spektrumun daha verimli kullanılmasına vurgu yapan modern bir spektrum paylaşımı yaklaşımıdır. Dinamik spektrum erişimi ile spektrum, belirli bir bölgede ve belirli bir zamanda özel kullanım için hizmetlere tahsis edilir, ancak bu tahsis mevcut politikadan çok daha hızlı bir ölçekte değişmektedir. Dinamik spektrum erişiminin alt başlığı olan hiyerarşik erişim modeli, birincil ve ikincil kullanıcılarla hiyerarşik bir erişim yapısını benimser. Bu modelde yer alan birincil kullanıcılar lisanslı kullanıcılardır. Birincil radyo kullanıcıları lisansı kullanmak için para ödemişlerdir ve dolayısıyla lisansın kullanım hakkı onlara aittir. İkincil kullanıcılar ise frekans bandını yalnızca boş olduğu zamanlarda kullanabilen ve bandın birincil kullanıcısı yayına başladığında, yayını en kısa sürede kesmesi gereken kullanıcılardır. Hiyerarşik erişim modelinde temel fikir, birincil kullanıcılar (lisans

sahipleri) tarafından algılanan paraziti sınırlandırırken lisanslı spektrumu ikincil kullanıcılara açmaktır.

Radyo ve Televizyon Üst Kurulu karasal yayıncılık bandında, yayıncı kurum ve kuruluşların hiyerarşide öncelikli olduğu, hiyerarşik bir erişim yapısı benimseyerek hem karasal yayıncılığın sektörün ihtiyaçlarına paralel olarak gelişimini destekleyebilir hem de mobil ve geniş bant hizmetlerin bu bantlarda spektruma erişimini sağlayarak boş kalan spektrumun verimli kullanılmasını sağlayabilir. Bahsedilen bu hiyerarşik yapıda, yayıncı kurum ve kuruluşlar spektrumu lisanslı olarak kullanan birincil kullanıcılardır. İkincil kullanıcılar ise talebe ve yayın hizmetleri üzerindeki girişim durumlarına bağlı olarak değişkenlik göstermek üzere mobil ya da geniş bant hizmetler olabilir.

RTÜK özelinde düşünüldüğünde tezin 3.bölümünde yer alan Şekil 3.2'de birincil servisler yayıncı kurum ve kuruluşları, spektrum koordinatörü ise RTÜK'ü temsil etmektedir. Şekil 3.2'de yer alan modelde, birincil kullanıcıların kendi birincil hizmetleri olan yayın hizmetleri için spektrum bantlarını kullanma hakları vardır. Ancak ek gelir elde edebilmek adına bu bandın bir kısmını (kırmızı taranmış bölge) ya da bandın kullanımı için belirli bir zaman aralığını kiralamaya isteklidirler. Hizmet kalitesi (QoS) ise her kiralamada etkilenebilecek olup, değerlendirilmesi önemli bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Modelde yer alan koordinatörün yani RTÜK'ün motivasyonu ise karasal yayıncılık bandında birincil ve ikincil kullanıcılar arasında köprü kurmak, spektrumun değerini korumak, spektrum fiyatında gerçekleşebilecek olan fahiş fiyat dalgalanmalarına engel olmak ve varsayılan ticaretten komisyon elde etmek olabilir. Özet olarak ise birincil kullanıcılar kullanmadıkları spektrumu kiralamak için bir fiyat teklif eder, koordinatör fiyatı kontrol eder, hizmet kalitesini de göz önünde bulundurarak, yakın bir fiyat teklifinde bulunan bir ikincil kullanıcının spektrumu kısıtlı olarak kullanmasına izin verir.

Önerilen bu modele benzer olarak düzenleyici çerçevede şu anda tartışılmakta olan birkaç spektrum paylaşım modeli bulunmaktadır. Örneğin, LSA konsepti Avrupa'da, daha verimli spektrum kullanımı için potansiyel bir araç olarak önemli ilgi görmüştür. LSA, bireysel lisansa dayalı olarak yerleşik kullanım sağlanırken, herhangi bir radyo sisteminin bir frekans bandına dahil edilmesini sağlayan geniş bir düzenleyici yaklaşımdır. Şekil 3.3'te yer aldığı üzere LSA modelinde görevli erişim olarak tanımlanan bir yerleşik sistem ve spektrumu ikincil öncelikle kullanabilen bir LSA lisanslı sistem yer almaktadır. LSA lisansı, ilgili paylaşım çerçevesiyle birlikte, bantta yer alan yerleşik kullanıcı ve LSA lisansı sahibi olmak için banda yeni giren kullanıcı arasında müzakere edilir. Lisans ulusal düzenleyici

otorite (NRA) tarafından verilir. Bu yaklaşımın, banda tahsis edilmiş yerleşik hizmetleri korurken yeni kullanıcıların bir frekans bandına girişini kolaylaştıracağı öngörülmektedir.

Genel LSA kavramı her tür radyo sistemi arasındaki paylaşımı kapsarken, standardizasyon ve düzenlemelerdeki mevcut faaliyetler özellikle LSA'in Uluslararası Mobil Telekomünikasyon (IMT) bantlarına uygulanmasına odaklanmaktadır. 2.3-2.4 GHz bandı LSA için ilk kullanım durumu olarak incelenmiştir.

ABD'de büyük ilgi gören bir diğer veri tabanı merkezli paylaşım modeli, spektrum kullanımında üç hiyerarşi düzeyi ile spektrum paylaşımını destekleyen spektrum erişim sistemidir (SAS). SAS, yetkili kullanıcıların üç katmanını yönetmek için dinamik bir spektrum veri tabanı ve parazit azaltma teknikleri içerir. Böylece SAS, bant genelinde gelişmiş, yüksek düzeyde otomatikleştirilmiş bir frekans koordinatörü olarak hizmet eder. Sonuç olarak hiyerarşide üst düzeyde yer alan kullanıcılar alttakilerden korunmuş olur ve bantta maksimum kapasite ve birlikte var olabilmeye izin vermek için frekans kullanımı optimize edilir. Bu yaklaşımda yerleşik sistemler, ağlarını veya sistemlerini kurdukları zaman ve yerde, özel spektrum erişimi ve zararlı parazitlere karşı garantili koruma dahil olmak üzere en yüksek düzeyde kullanım haklarına sahiptir. SAS sisteminde Yerleşik Sistem, Öncelikli Erişim Lisansı (PAL) ve Genel Yetkili Erişim (GAA) olmak üzere üç katmanlı bir hiyerarşi düzeni yer almaktadır.

Spektrum paylaşım modellerinin uygulanabilir olması adına düzenleyici bakış açısıyla üzerinde durulması gereken bazı kriterler bulunmaktadır. Bunlar;

- Verimli spektrum kullanımının teşvik edilmesi,
- Mevcut spektrum kullanıcısına ve yeni kullanıcıya yönelik zararlı girişimi en aza indirecek için çeşitli teknik önlemler alınması,
- Yeni sistemlerin mevcut sistemlerle uyumlu olması,
- Paylaşıma sunulan kaynağa öngörülebilir erişim ve güvenilir kullanım koşullarının sağlanması,
- Spektrum paylaşımına dair uygulama ve yaptırım düzenlemeleri,
- Spektrum paylaşımında adalet ve rekabet ortamı sağlanarak, yeni oyuncuların sektöre girişini teşvik etmesi ve spektrum pazarına giriş engelini azaltması,
- Görevliler ve yeni kullanıcılar arasındaki veri alışverişinin güvenli olması, güncel ve doğru bilgiler içermesi,
- Spektruma erişim sağlamak için gereken süreyi kısaltarak inovasyona teşvik etmesidir.

Bu tezde RTÜK'ün yetkisinde olan karasal yayıncılık bandı için tasarlanabilecek dinamik spektrum erişimi konseptlerinde, spektrum paylaşım mekanizmaları için yukarıda bahsi geçen kriterlerin sağlanması adına blok zincir yaklaşımları incelenmiştir. Blok zincir teknolojisi, günümüzde kamu kurumları vasıtasıyla toplumda yerine getirilen idari görevlerin büyük bir bölümünü kolaylaştırabilir. Örneğin kamu kurumları, toplumlardaki ekonomik faaliyetleri kolaylaştırmak için kendi başlarına bilgi depolama ve bilgi alışverişi süreçlerini sağlamak yerine blok zinciri protokolünü kullanabilir. Bu noktada, bu altyapıda gerçekleşen işlemlerde denetleyici bir rol üstlenmelidirler.

Blok zincir tabanlı dinamik spektrum paylaşımı için bazı kilit kavramlar bulunmaktadır. Blok zincir tarafından sağlanan dağıtılmış defter, spektrum işlem kayıtlarının açık, şeffaf, değişmez ve izlenebilir olmasını sağlamaktadır. Böylece dolaşımdaki çeşitli bağlantılar arasında güvenilir bir ilişki kurulur. Güvenli Spektrum Defteri olarak adlandırılan bu yapı, spektrum paylaşımının uygulanmasını büyük ölçüde teşvik eder. Buradan hareketle, blok zinciri tabanlı dinamik spektrum paylaşımı'nın (DSS) temelinde spektrum bilgilerini kaydeden dağıtılmış bir defter olduğu söylenebilir.

RTÜK spektrum paylaşımında bir veri tabanı yapısı olarak blok zincir yaklaşımlarını kullandığı takdirde, karasal yayıncılık bandında kullanılabilecek olan Güvenli Spektrum Defteri, spektrum kullanıcılarına bilgiye erişimde güvenli ve güncel bir altyapı sağlayabilir. Şekil 3.5'te spektrum defterinde; spektrum için yapılan açık artırmalar, spektrum erişim geçmişi ve boş spektrum gibi bilgilerin yanı sıra, harici spektrum algılama ekipmanından gelen spektrum algılama verileri de yer almaktadır. Defterin içerdiği veriler, oluşturulacak olan modele göre değişiklik gösterebilir. Ancak, karasal yayıncılık spektrumunun birincil kullanıcılara açık arttırmalar yoluyla tahsis edilmesi ve boş spektrumun spektrum algılama ekipmanlarıyla tespit edilmesi fikri RTÜK için örnek teşkil edebilir. Şekil 3.6'da spektrum bloğu mimarisinde görüldüğü üzere her blok birbirine bir önceki bloğun hash'i ile bağlıdır. Bu noktada blok zincirde kullanılan hash fonksiyonu zincirde meydana gelebilecek müdahelelere karşı, spektrum bloklarını değişime karşı korunaklı kılar.

Spektum paylaşım modelinde dijital kodlar şeklinde tanımlanan akıllı sözleşmeler; dinamik spektrum paylaşımını kolaylaştıran varlık transferi ve spektrum işlem bilgilerine esnek bir şekilde yerleştirilebilir. Şekil 3.7'de gösterildiği gibi; tetikleme koşulları, yanıt kuralları ve sözleşme koşullarının güvenilir veri kaynakları, akıllı sözleşme kodlarında önceden ayarlanmıştır. Tetikleyici koşullar, sistemin düzenini sağlamak için belirli işlem zamanını, veri kaynaklarını ve paylaşım kurumlarını içermektedir. Akıllı sözleşmelerde bir eylem karşılığında ücret için anlaşılmışsa, borcun ifası gibi tetikleyici işlem gerçekleştiği

zaman eylem sözleşme tarafından kendiliğinden gerçekleşir. Yanıt kuralları, işlemlerin meşruiyetini sağlamak için belirli ticari işlemleri, yasal anlaşmaları vb. içerir.

İkincil spektrum marketinin (SSM) oluşturulması amacıyla, spektrum ticareti ağındaki her bir katılımcının durumu oldukça dinamiktir. Bu sebeple, farklı katılımcıların ticaret anlaşmalarını etkin bir şekilde ayırmak için her bağımsız bloğa akıllı sözleşmeler eklenebileceği değerlendirilmektedir.

Şekil 3.7'de gösterildiği gibi; tetikleme koşulları, yanıt kuralları ve sözleşme koşullarının güvenilir veri kaynakları, akıllı sözleşme kodlarında önceden ayarlanmıştır. Tetikleyici koşullar, sistemin düzenini sağlamak için belirli işlem zamanını, veri kaynaklarını ve paylaşım kurumlarını içermektedir. Akıllı sözleşmelerde bir eylem karşılığında ücret için anlaşılmışsa, borcun ifası gibi tetikleyici işlem gerçekleştiği zaman eylem sözleşme tarafından kendiliğinden gerçekleşir. Yanıt kuralları, işlemlerin meşruiyetini sağlamak için belirli ticari işlemleri, yasal anlaşmaları vb. içerir.

Blok zincirler DLT'nin bir alt kümesi olsa da, literatür çoğu DLT'yi blok zinciri olarak adlandırdığı için bu iki terim birbirinin yerine kullanılabilmektedir. Dağıtılmış bir defter, bağımsız katılımcıların (düğümlerin) depolanan kayıtlar üzerinde bir anlaşma oluşturmasını sağlayan bir elektronik kayıt sistemidir. Bu düğümlerin, kayıtların sıralaması üzerinde anlaşmaya varması ve bunlardaki işlemleri kriptografik olarak doğrulaması gerekir. Kayıtlar, verilerin birden çok düğüm arasında kopyalanmasıyla kalıcı hale getirilir. Kayıtların her biri kriptografik karmalarla bağlanarak kurcalanmaya karşı koruma oluşturulmuş olur. Anlaşma veya fikir birliği sürecinin ortak sonucu, defterdir ve kayıtların yetkili versiyonu olarak hizmet eder. Dağıtılmış defterler karmaşık kriptografik veri yapıları kullanır.

Dağıtılmış Defter Teknolojisi (DLT);

• Kurumlar arası kayıt tutma ve şeffaflık yoluyla güven,

• Akıllı sözleşmeler yoluyla otomasyon,

• Çok taraflı bir arada var olmanın merkezi olmayan optimizasyonu,

gibi hususları kolaylaştırarak spektrum paylaşımı ve ticareti için gerekli teşvikleri oluşturabilir.

Dağıtılmış bir defter üzerinde spektrum varlıklarını temsil etmek için, uzay ve zaman ölçeğinde iyi tanımlanmaları gerekmektedir. Bu noktada ölçeğin küçük tutulması, ortaya çıkan spektrum piyasasının akıcı olmasına sebep olabilir. Bu ölçeği kullanarak, spektrum hakları tokenlaştırılır, yani varlığa ilişkin yasal mülkiyet hakları, DLT tabanlı sistemde alınıp satılabilen varlık jetonları olarak temsil edilir. Bu tokenlar, DLT sistemi içindeki bir hizmete

erişim elde etmek için kullanılabilir. Dolayısıyla hizmet tokenları, varlık tokenları için de değiştirilebilir. Bu token'lar için bir pazar ortaya çıkarsa, bu jetonlar itibari para veya kripto para birimleri için alınıp satılabilir.

Dağıtılmış bir defter üzerinde spektrum varlıklarını temsil eden ve buna bağlı olarak ikincil spektrum marketini oluşturan sistem, bir çok kuruluşu içeren düzenlenmiş bir kurulumda konsorsiyum aracılığıyla yönetilmelidir. Hem zincir içi hem de zincir dışı yönetişimin, konsorsiyum için tüm süreç ve normları tanımlaması beklenir. Konsorsiyumun düzenleyicinin spektrum paylaşımına ilişkin kurallarına dayalı olarak, zincir dışı süreçler ve sorumluluklar üzerinde anlaşmaya varması gerekir. Bu sistemi çalıştırmak için gerekli aktörler dört ana gruba ayrılır: yöneticiler, geliştiriciler, ağ geçitleri ve katılımcılar. Böyle bir sistemin oluşturulması halinde RTÜK düzenleyici tarafta yer alan, yöneticiler grubunda bulunur. Düzenleyici rolde yer alan RTÜK; ağ erişimi, spektrum fiyatlandırması, rekabet, mahremiyet ve veri koruması için kurallar belirlemelidir. Ayrıca yöneticiler grubunda; spektrum lisansı sahipleri ve spektrum lisansı talep edenlerinde bulunabileceği değerlendirilmiştir. Spektrum lisansı sahipleri ve spektrum lisansı talep edenler için bir borsa arayüzü oluşturulmalıdır. Düzenleyici rolde yer alan RTÜK; ağ erişimi, spektrum fiyatlandırması, rekabet, mahremiyet ve veri koruması için kurallar belirlemelidir.

Geleneksel frekans tahsislerinin aksine spektrum paylaşımı yaklaşımları; spektrumu kullanma hakkı bulunan birden çok kullanıcıyı, erişim haklarını ve kullanım bilgilerini, veri tabanları kullanarak organize eden yönetim mekanizmaları olarak tanımlanabilir. Blok zincir teknolojisinin temelde bir veri tabanı yapısı olması, bu yapıyı spektrum paylaşımı biçimlerinin etkinliğini arttırıp arttıramayacağı konusunda araştırılmaya değer kılmaktadır.

Örneğin Yrjöla (2018) CBRS (Citizens Broadband Radio Service-Yurttaş Geniş Bant Radyo Hizmeti) olarak adlandırılan spektrum paylaşım ortamı için blok zinciri teknolojisinin kullanılabilirliğini incelemiştir. CBRS, Federal İletişim Komisyonu'nun (FCC), 3550-3700 MHz frekans bandının verimli bir şekilde ortak kullanımına izin vermek için kurduğu bir hizmettir. CBRS hizmeti, daha önce hiyerarşik erişim olarak bahsedilen farklı kullanım öncellikleri olan üç farklı katmanlı lisans tipi içermektedir.

Bu sistemde, CBRS antenini veya anten dizisini destekleyen bileşen Yurttaş Geniş Bant Radyo Servis Cihazı (CBSD- Citizens Broadband Radio Service Device) ve merkezi bir Spektrum Erişim Sistemi (SAS) olmak üzere iki temel bileşen yer almaktadır. Her CBSD, bir Spektrum Erişim Sistemi'ne (SAS) kaydolur ve ardından spektrum talebini iletir. Talepte belirtilen parametreler, tahsis edilen radyo kanallarını (frekans aralığı) ve gerekli Etkin İzotropik Yayılan Gücü (EIRP) veya cihazın iletebileceği maksimum güç seviyesini içerir.

SAS, FCC veri tabanlarına ve yerleşik raporlama sistemlerine bağlanır. SAS ayrıca Çevresel Algılama Yeteneği (ESC) sistemleriyle arayüz oluşturur. ESC sistemleri, bölgedeki radar kullanımını otomatik olarak algılar. Üç katman arasında paraziti önlemek için SAS, görevli erişim, öncelikli erişim ve genel erişim katmanları arasında erişime öncelik veren bir frekans koordinatörü görevi görür. Özetle SAS katmanlara göre atanan öncelik sırasını korurken, kullanıcılara dinamik olarak kanal atamaktan sorumludur.

Şekil 3.13'te yar alan CBRS mimarisine benzer bir sistem RTÜK tarafından karasal yayıncılık bandına da uyarlanabilir. Bu noktada;

- SAS yöneticilerinin gereken verileri paylaşmaları ve muhafaza etmeleri,
- SAS'ler arasında gerçek zamanlı veri alışverişine ihtiyaç duyulması,
- İkincil spektrum talebindeki artışla birlikte, gerçek zamanlı spektrum varlık transferi,
- Birbirine güvenmeyen kuruluşlar arasında koordinasyon,

gibi hususlar bu sistemdeki zorlukları ifade etmektedir. CBRS hizmetinde bahsedilen zorlukların blok zincir kullanılarak azaltılabileceği düşünülmektedir. Buna göre blok zincir teknolojisinin hiyerarşik yapılı bir spektrum paylaşım modelinde;

- Dağıtılmış kanalların çakışmasını ortadan kaldırarak, kanalları dinamik, şeffaf ve adil bir şekilde tahsis edebileceği,
- Fikir birliği sağlayarak ve hassas bilgilerin gizliliğini koruyarak rakip, birbirlerine güvenmeyen kuruluşlara ait SAS'ler arasındaki iletişimi otomatikleştirmeye yardımcı olabileceği,
- Sözleşme, komisyonculuk ve veri alışverişinde işletmeler arası karmaşık ve çok adımlı iş akışlarının otomatikleştirilmesi yoluyla spektrum paylaşımı işlem maliyetlerini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahip olabileceği,
- Spektrum yönetimine getirilebilecek esneklik ve ölçeklenebilirlik ile spektrum piyasasına giriş engelini azaltabileceği,
- Spektruma yeni giren kullanıcıların özel iş ihtiyaçlarına göre yerel spektruma erişmelerini sağlayabileceği,
- İdari bir spektrum yönetiminden, piyasaya dayalı bir spektrum yönetimine geçişe katkıda bulunabileceği,
- Kriptografik doğrulanabilirlik ve otomasyona olan katkılarının, herhangi bir paylaşım konsepti için temel tetikleyici olan kilit paydaşlar ve cihazlar arasında güveni oluşturduğu ve artırdığı değerlendirilmektedir.

Bu tezde aynı zamanda nakit dışı bir yaklaşımlara dayalı ikincil spektrum ticaret modelleri incelenmiştir. Yapılan bazı çalışmalarda birincil ve ikincil kullanıcılar arasında gerçekleşen spektrum ticareti ve ticaret sonucunda bloklarda veri doğrulama yapan ağ düğümlerine ödül verilmesi hususlarında spektrum coin (SC) kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Bu fikir temelde, ikincil spektrum ticareti esnasında bir değer transferi olarak itibari para yerine sanal tokenlar kullanılabileceğini öne sürmektedir. Bu yaklaşımın RTÜK öncülüğünde karasal yayıncılık bandına uyarlanarak; bilişsel radyo kullanılarak veya kullanılmayarak, ikincil spektrum pazarı oluşturulmasına yönelik ışık tutabilecek nitelikte olduğu değerlendirilmektedir.

Spektrum token kullanımı, ikincil spektrum pazarını oluşturan kuruluşlar arasında bir metodoloji sağlar ve bankaları ya da herhangi bir üçüncü tarafın katılımını ortadan kaldırarak artan işlem maliyetlerinden kaçınmaya yardımcı olabilir. Khan, Jamali, Maksymyuk ve Gazda'nın (2020) spektrum token dijital varlığının yer aldığı ikincil spektrum pazarı yaklaşımına dair araştırmasında, sistemdeki sadeliği korumak adına spektrum koordinatörünün kar amacı gütmeyen bir varlık olduğu varsayılmaktadır.

Şekil 3.14'te yer alan merkezi bir spektrum koordinatörü tarafından yönetilen ikincil radyo spektrum ticareti mimarisinde, birincil spektrum kullanıcıları paylaşmak istedikleri frekans bandına dair bilgileri ve bunlara karşılık gelen fiyatları belirterek kapalı tekliflerini verirler. Spektrum koordinatörü ise açık artırma süreçlerini yöneten ve teklif tahsislerini yapmaktan sorumlu olan taraftır. Arz ve talebe dayalı olarak, birincil spektrum kullanıcıları spektrum paylaşım sistemindeki son kullanıcılara hizmet sağlamak ve bundan bir gelir elde etmek maksatlı spektrumlarını takas ederler. RTÜK'ün spektrum koordinatörü olarak görev aldığı böyle bir yapıda;

- Sistemde son kullanıcılar ve birincil spektrum kullanıcıları arasında herhangi bir iletişim gerekliliği olmaması, iletişim yükünün azaltılmış olmasının avantajlarını sunar.
- En yüksek katkıyı sağlayan birincil spektrum kullanıcılarının kar paylarını maksimize ederken, en düşük düzeyde katılım sağlayanların da zararlarını maksimize etmeye olanak sağlayan taban ve ticaret kuralı uygulaması ile birincil spektrum kullanıcılarının sistemde aktif olması teşvik edilerek spektrum kullanımında verimlilik düzeyi arttırılmış olur.

Genel blok zincirleri, ortak anahtarları tarafından tanımlanan ağa katılmak isteyen herhangi bir kuruluşa açıktır. Bitcoin ağı, iyi bilinen bir halka açık blok zinciridir. Özel/izinli

bir blok zinciri ise yalnızca yetkili kuruluşlara açıktır ve bir kuruluşun ağına katılabilmesi için genellikle bir davet/izin gerektirmektedir.

Blok zincir teknolojisi, her ne kadar popüler bir veri tabanı mimarisi olsa da her senaryo için en iyi çözüm değildir. Eldeki uygulama için blok zincirinin kullanışlılığını değerlendirmenin ilk adımı uygulamanın; ademi merkeziyetçilik, şeffaflık, değişmezlik, kullanılabilirlik ve güvenlik gibi blok zincirin temel özelliklerine ne düzeyde ihtiyacı olduğunu sorgulamaktır. Örneğin, ilgili tüm veriler tek bir güvenilir tarafın kontrolü altında kalacaksa, merkezi olmayan bir çözüme gerek yoktur.

Önerilen herhangi bir blok zinciri kullanım durumu için temelde iki kritik soru bulunmaktadır: Çözülmesi gereken sorun nedir ve blok zinciri neden mevcut veri tabanı teknolojilerinden üstündür? Spektrum paylaşımı konseptinde, blok zincirin genel özelliklerinin mevcut rejimlerin sınırlamalarını ele alabilecekleri bir dizi işlev vardır. Blok zincir yaklaşımları hem ticari hem de teknik faydalar vaat etmektedir. Bununla birlikte, her biri farklı avantajlar ve dezavantajlar sunan genel (halka açık) ve izin verilen blok zincirler arasında daha fazla ayrım yapılması gerekmektedir.

Blok zincirin spektrum paylaşımına dair olası katkıları;

- Spektrum yönetimi ve denetimi için şeffaf bir defter,
- Veri tabanları için güçlü güvenlik ve yüksek kullanılabilirlik,
- Akıllı sözleşmeler, karmaşık paylaşım düzenlemelerine olanak sağlamasıdır.

Blok zincirin spektrum paylaşımına dair;

- Konsensüs protokollerinin ek yükü sistemleri zorlayabilecek olması,
- Genel blok zincirleri için yönetişimin belirsiz olması durumu
- Geleneksel veri tabanlarına göre faydaları net olarak bilinmemesi,
- Blok zinciri ağlarının, ilgili merkezi olmayan uygulamaların ve akıllı sözleşmelerin işletilmesinin fazla maliyetli olabileceği gibi sınırlamaları bulunmaktadır.

Öneriler

Bu tez çalışmasında yapılan incelemeler ile elde edilen veriler ışığında verilebilecek tavsiyeler şunlardır:

- Bilindiği üzere WRC-2019 ile birlikte hâlihazırda karasal televizyon yayıncılığında kullanılmakta olan 470-694 MHz frekans aralığının IMT servisi için değerlendirilmesi hususu bir sonraki toplantı olan WRC-2023'ün gündem maddeleri arasına girmiştir. Karasal televizyon yayınlarının analogdan sayısala geçişiyle serbest kalan spektrum miktarı olan sayısal pay spektrumunun açılabileceği yenilikçi kullanım yelpazesi araştırılmalıdır.

- Bahsi geçen yenilikçi kullanım alanları ve hali hazırda kullanılan yayıncılık bandı frekanslarında veya bitişik frekanslarda aynı anda ve aynı yerde iletilen sinyallerin birbirleriyle etkileşim durumları incelenmelidir.

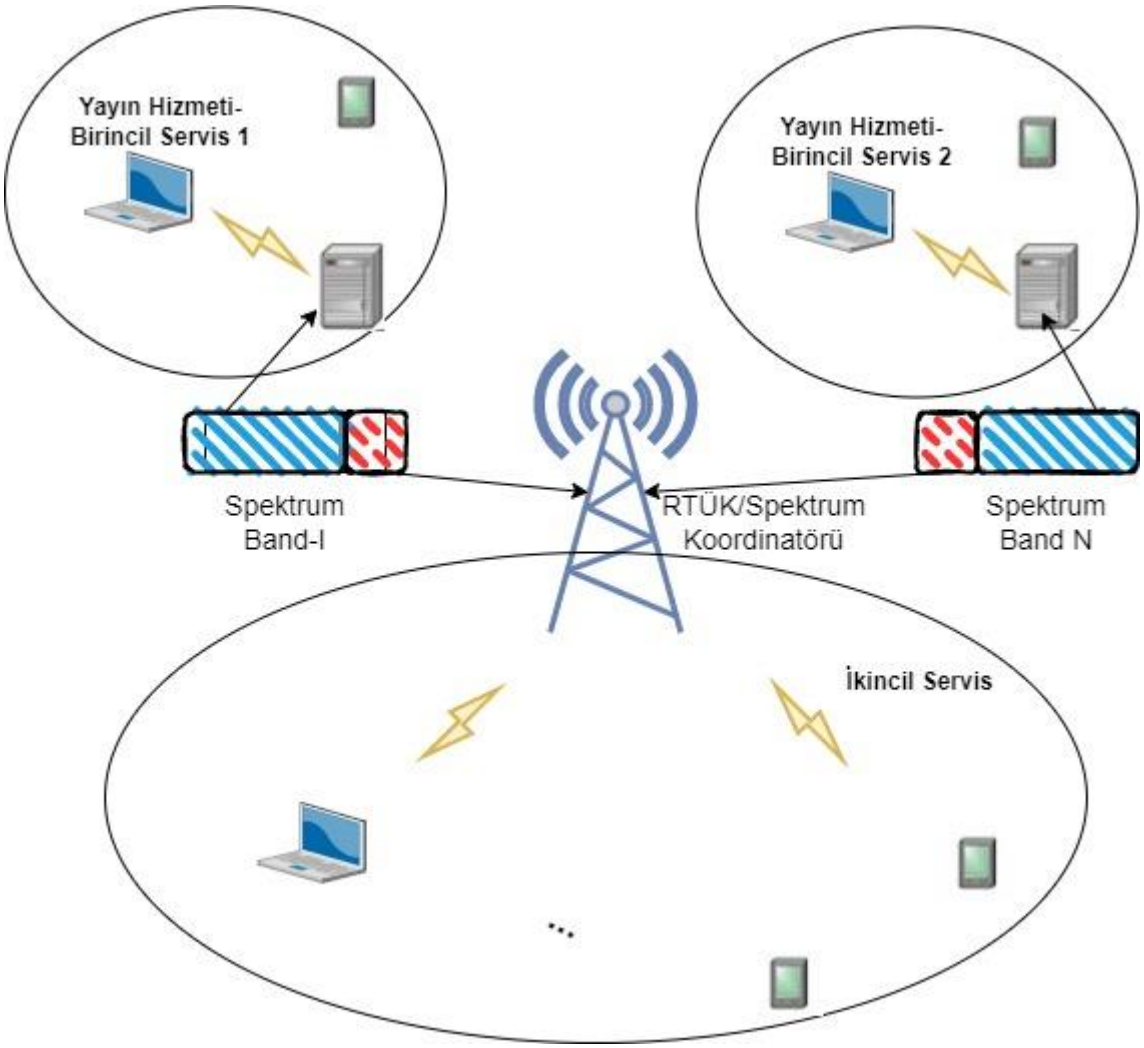
- İkincil spektrum marketine olabilecek talep ile ilgili araştırmalar yapılmalıdır.

- Spektrumun ne kadar verimli kullanıldığı, ne kadar bir kısmının ne kadar süreyle boşta kaldığına dair istatistikler çıkarılmalıdır.

- Düzenleyici çerçevede yer alan LSA, SAS ve CBRS gibi hizmetlerin mimarisinden yararlanarak, karasal yayıncılık bandında yayıncı kurum ve kuruluşların hiyerarşide öncelikli olduğu, hiyerarşik bir erişim yapısı ile hem karasal yayıncılığın sektörün ihtiyaçlarına paralel olarak gelişimi desteklenmeli hem de mobil ve geniş bant hizmetlerin bu bantlarda spektruma erişimi ile boşta kalan spektrumun verimli kullanılmasını sağlayacak demo çalışmaları yapılmalıdır. Şekil 4.1'de yer alan modelin bu çalışmalara yön verebileceği değerlendirilmektedir. Tablo 4.1'de ise modelde yer alan paydaşlar belirtilmiştir.

Şekil 4.1

Karasal Yayıncılık Bandında Spektrum Paylaşım Modellemesi Dynamic Spectrum Sharing With Multiple Primary and Secondary Users. Lin vd., 2011, s. 1756



Tablo 4.1

Karasal Yayıncılık Bandında Spektrum Paylaşım Modeli Paydaşları

Spektrum Koordinatörü	**Birincil Servis Kullanıcıları**	**İkincil Servis Kullanıcıları**
RTÜK	Yayıncı Kurum ve Kuruluşlar	Mobil Hizmetler, Genişbant Hizmetler ve potansiyel yeni teknolojiler

- RTÜK ve üniversiteler işbirliği ile blok zincir tabanlı spektrum paylaşımında yer alabilecek teknolojiler incelenmeli ve bunlara yönelik AR-GE çalışmaları yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

A Guide to the Spectrum Framework Review. (2005). OFCOM. https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0012/34104/sfr_guide.pdf

Adda, J., & Ottaviani, M. (2004). The Transition to Digital Television. Economic Policy January, 159-209.

Akyildiz, I. F., Lee, W., Vuran, M. C., & Mohanty, S. (2006). NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. Computer Networks, 50(13), 2127-2159. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.05.001

Al-Jaroodi, J., & Mohamed, N. (2019). Blockchain in industries: A survey. IEEE Access, 7, 36500-36515. https://doi.org/10.1109/access.2019.2903554

Allessie, D., Sobolewski, M., & Vaccari, L. (2019). Blockchain for digital government: An assessment of pioneering implementations in public services (EUR 29677 EN). EU-JRC Science for Policy Report.

Analog vs. digital signals: Uses, advantages and disadvantages. (n.d.). MPS | Monolithic Power Systems. Retrieved July 21, 2022, from https://www.monolithicpower.com/en/analog-vs-digital-signal

Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S., Lozano, A., Soong, A. C., & Zhang, J. C. (2014). What Will 5G Be? IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 32(6), 1065–1082.

API Nedir? (2021, Mayıs 27). IdeaSoft.https://www.ideasoft.com.tr/application-programming-interface-nedir/, Erişim tarihi:10.08.2022

Atzori, M. (2015). Blockchain technology and decentralized governance: Is the state still necessary? SSRN Electronic Journal, 6(1), 45-62. https://doi.org/10.2139/ssrn.2709713

Baby, S. M., & James, M. (2016). A comparative study on various spectrum sharing techniques. Procedia Technology, 25, 613-620. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.152

Back, A. (2002). Hashcash - A Denial of Service Counter-Measure. http://www.hashcash.org/hashcash.pdf

Bai, C. (2019). State-of-the-Art and future trends of blockchain based on DAG structure. Structured Object-Oriented Formal Language and Method, 183-196. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13651-2_11

Bayhan, S., Gür, G., & Alagöz, F. (2007). UYDU SİSTEMLERİ İLE TÜMLEŞİK BİLİŞSEL AĞLAR: YENİ BİR MİMARİ. Akademik Bilişim 2008.

Bayhan, S., Zubow, A., & Wolisz, A. (2018). Spass: Spectrum sensing as a service via smart contracts. 2018 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). https://doi.org/10.1109/dyspan.2018.8610483

Bedford Taylor, M. (2013). Bitcoin and the age of bespoke silicon. 2013 International Conference on Compilers, Architecture and Synthesis for Embedded Systems (CASES). https://doi.org/10.1109/cases.2013.6662520

Benkler, Y. (1998). Telecommunications policy research conference. https://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/bitstream/handle/10535/414/commons%5b1%5d.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Beutler, R. (2012). The digital dividend of terrestrial broadcasting. Springer. DOI 10.1007/978-1-4614-1569-5

Beutler, R. (2016). Evolution of broadcast content distribution. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-31945973-8

Beutler, R. (2016). Evolution of broadcast content distribution. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-45973-8

Bevelacqua, P. (n.d.). Antenna gain. The Antenna Theory Website. Retrieved July 21, 2022, from https://www.antenna-theory.com/basics/gain.php

Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu. Spektrum Yönetimi. https://www.btk.gov.tr/spektrum_yonetimi, Erişim tarihi:19.07.2022
Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu. (t.y.). Spektrum Yönetimi. https://www.btk.gov.tr/spektrum_yonetimi, Erişim tarihi:21.07.2022
Bitcoin: Clarifying the foundational innovation of the blockchain. (2014, December 15). Continuations by Albert Wenger. Retrieved August 2, 2022, from https://continuations.com/post/105272022635/bitcoin-clarifying-the-foundational-innovation-of
Blackman, C., & Srivastava, L. (2013). Telecommunications Regulation Handbook: Tenth Anniversary Edition. https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/pref/D-PREF-TRH.1-2011-PDF-E.pdf
Botsman, R. (2020, January 31). The real meaning of trust - Why trust matters with Rachel Botsman video tutorial | LinkedIn learning, formerly Lynda.com. LinkedIn. Retrieved August 1, 2022, from https://www.linkedin.com/learning/why-trust-matters-with-rachel-botsman/the-real-meaning-of-trust
BTK. (2019). Milli Frekans Planı. Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu. https://www.btk.gov.tr/uploads/undefined/mfp-01-02-2019.pdf, Erişim tarihi:15.08.2022
Buckwitz, K., Engelberg, J., & Rausch, G. (2014). Licensed shared access (Lsa) – regulatory background and view of administrations. Proceedings of the 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks, 413-416. https://doi.org/10.4108/icst.crowncom.2014.255774
Buterin, V. (2017, April). Blockchain and Smart Contract Mechanism Design Challenges [Conference session]. Trusted Smart Contracts, Malta.
Caicedo, C. E., & Weiss, M. B. (2010). The viability of spectrum trading markets. 2010 IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum (DySPAN), 46-52. https://doi.org/10.1109/dyspan.2010.5457846
Carritech Telecommunications. (2018, January 9). What is modulation in telecommunications? Retrieved July 21, 2022, from https://www.carritech.com/news/what-is-modulation-in-telecommunications/
Cave, M. (2002). Review of radio spectrum management: An independent review for Department of trade and industry and HM treasury. http://web1.see.asso.fr/ICTSR1Newsletter/No004/RS%20Management%20-%202_title-42.pdf
Cave, M., & Webb, W. (2015). Spectrum Trading. In Spectrum management: Using the airwaves for maximum social and economic benefit (pp. 113-127). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781316145708.008
Cave, M., Doyle, C., & Webb, W. (2011). Essentials of modern spectrum management. Cambridge University Press.
Cave, M., Majumdar, S. K., & Vogelsang, I. (2002). Handbook of telecommunications economics: Technology evolution and the internet (1st ed.). Emerald Publishing.
CEPT Electronic Communications Committee. (2014). Licensed Shared Access (LSA) (ECC Report 205). http://spectrum.welter.fr/international/cept/ecc-reports/ecc-report-205-LSA-2300-MHz-2400-MHz.pdf
Chaduc, J., & Pogorel, G. (2008). The radio spectrum (1st ed.). Wiley-ISTE.
Chaduc, J., & Pogorel, G. (2010). The radio spectrum: Managing a strategic resource. John Wiley & Sons.
Client software definition: 630 samples. (n.d.). Law Insider. Retrieved August 10, 2022, from https://www.lawinsider.com/dictionary/client-software
Collins, G. W. (2000). Fundamentals of digital television transmission. Wiley-IEEE Press.

Commission of the European Communities. (2003, September). Communication From The Commission To The Council, The European Parliament, The European Economic And Socıal Committee And The Committee Of The Regions: on the transition from analogue to digital broadcasting (from digital 'switchover' to analogue 'switch-off') [Conference session]. COM(2003) 541 final, Brussels.

Cronin, E., Kurc, A. R., Filstrup, B., & Jamin, S. (2004). An efficient synchronization mechanism for mirrored game architectures. Multimedia Tools and Applications, 23(1), 7-30. https://doi.org/10.1023/b:mtap.0000026839.31028.9f

Cryptech Kriptoloji Laboratuvarı. (2018). Blok Zinciri Bir Veri Tabanı Yapısı. www.crypttech.com

Dattani, J., & Sheth, H. (2014). Overview of Blockchain Technology. Asian Journal of Convergence in Technology, 5(1).

Drescher, D. (2017). Blockchain basics: A non-technical introduction in 25 steps. Apress.

Durukal, O. (2021). Kamu ve Özel Sektörde Blokzincir Teknolojisi.

Ebubekir Sahin. (2021, March 6). Ebubekir ŞAHİN. https://www.ebubekirsahin.com/haber/63, Erişim tarihi:21.07.2022

ECB. (2015). Virtual currency schemes: A further analysis.

Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT). (2008). "Technical considerations regarding harmonisation options for the Digital Dividend" (CEPT Report 24). http://spectrum.welter.fr/international/cept/cept-reports/cept-report-024-digital-dividend-WSD.pdf

Engineering and Technology History Wiki. (2020, August 13). History of Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) Standards. ethw.org. Retrieved July 4, 2022, from https://ethw.org/History_of_Institute_of_Electrical_and_Electronic_Engineers_(IEEE)_Standards

Ensuring the continued functioning of business operations. (2022, July 25). Cloudian. Retrieved August 3, 2022, from https://cloudian.com/guides/data-protection/data-availability/

Ethereum Whitepaper. (2022, July 25). ethereum.org. Retrieved August 2, 2022, from https://ethereum.org/en/whitepaper/#decentralized-file-storage

European Broadcasting Union. (2010). Terrestrial Broadcasting in Europe (EBU – Recommendation R 131). https://tech.ebu.ch/docs/r/r131.pdf

European Commission. (2010). *Accompanying document to the Proposal for a Decision of the European Parliament and of the Council establishing the first radio spectrum policy programme* ({COM(2010) 471} {SEC(2010) 1035}). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52010SC1034&qid=1658143777096&from=EN

European Conference of Postal and Telecommunications Administrations - CEPT. (2022, July 4). *Cept.org - CEPT - About CEPT - Background*. CEPT.ORG. Retrieved July 21, 2022, from https://www.cept.org/cept/background

European Parliament-EP. (2012). Official Journal. *Council of the European Union – the Council (2012). Decision No. 243/2012/EU of the European Parliament and of the Council of 14 March 2012 establishing a multiannual radio spectrum policy programme*, 7-8. https://doi.org/10.1515/9783866539686.335

Falciasecca, G., & Vallotti, B. (2009, November). *Guglielmo Marconi: the pioneer of Wireless Communications* [Paper presentation]. Proceedings of the 39th European Microwave Conference. https://www.researchgate.net/publication/224607546_Guglielmo_Marconi_The_pioneer_of_wireless_communications

FCC Technological Advisory Council. (2014). *Introduction to Interference Resolution, Enforcement and Radio Noise A White Paper*. https://transition.fcc.gov/bureaus/oet/tac/tacdocs/meeting61014/InterferenceResolution-Enforcement-Radio-Noise-White-Paper.pdf

FCC. (2003, May 15). FCC Adopts Spectrum Leasing Rules And Streamlined Processing For License Transfer and Assignment Applications and Proposes Further Steps to Increase Access to Spectrum Through Secondary Markets. *FCC NEWS*.

FCC. (2015). *Second further notice of proposed rulemaking* (FCC 15-47).

FCC. (2015). *Small Entity Compliance Guide Amendment of the Commission's Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550-3650 MHz Band* (DA 15-955).

Federal Communications Commissions. (2021, June 29). *Spectrum Leasing*. Federal Communications Commission. Retrieved July 25, 2022, from https://www.fcc.gov/wireless/bureau-divisions/technologies-systems-and-innovation-division/spectrum-leasing#:~:text=Spectrum%20leasing%20is%20part%20of,2)%20De%20Facto%20Transfer%20leasing

Filippi, P. D. (2018). *Blockchain and the law: The rule of code*. Harvard University Press.

Food and Agriculture Organization of the United Nations, & International Telecommunication Union. (2019). *E-agriculture in action: Blockchain for agriculture: Opportunities and challenges*. Food & Agriculture Org. https://www.ops.gov.ie/app/uploads/2020/10/Blockchain-for-Agriculture.pdf

Forge, S., Blackman, C., & Bohlin, E. (2008). Economic impacts of alternative uses of the digital dividend. *Intereconomics*, *43*(3), 149-162. https://doi.org/10.1007/s10272-008-0250-2

Frekans Nedir? (t.y.). https://diyot.net/. https://diyot.net/frekans-nedir/, Erişim tarihi:21.07.2022

Further applications of the blockchain. (2014). In Columbia University PhD in Sustainable Development 10 Year Anniversary Conference. https://www.researchgate.net/publication/276304843_Further_applications_of_the_blockchain

Gedik, A. (t.y.). Yeni İletişim Teknolojilerinden Yüksek Tanımlamalı (HD) Yayın Sistemleri ve Odyovizüel Veri Transferindeki Pratikleşme.

Gevri, A. (2019). Spektrum Yönetimi: Ulusal Güvenlik Bağlamında Ülkemizdeki Karasal Yayıncılık Spektrumunun Yönetimi. Radyo ve Televizyon Üst Kurulu.

Graf, R. F. (1999). Modern dictionary of electronics. Newnes.

Grønsund, P., Grøndalen, O., & Lähteenoja, M. (2013). Business case evaluations for LTE network offloading with cognitive femtocells. Telecommunications Policy, 37(2-3), 140-153. https://doi.org/10.1016/j.telpol.2012.07.006

GSM Association. (2009). Digital Dividend for Mobile: Bringing Broadband to All. https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2012/07/Spectrum-Digital-dividend-for-mobile-English.pdf

GSM Association. (2013). TV White Space. https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2013/04/GSMA-Policy-Position-on-TV-white-space.pdf

Guidance on the Regulatory Framework for National Spectrum Management (ITU-R SM. 2093). (2018). ITU. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2093-3-2019-PDF-E.pdf

Günen, E. (2020, May 31). Hash Nedir? Bitcoin SHA-256 Algoritması Nasıl Çalışır? Cointelegraph. https://tr.cointelegraph.com/news/what-is-hash-whats-the-meaning-of-bitcoin-sha-256-algorithm, Erişim tarihi:12.01.2023

Günen, E. (2020, May 31). Nonce Nedir? Bitcoin Madenciliğinde nonce Ne Demek? Cointelegraph. https://tr.cointelegraph.com/news/what-is-nonce-what-is-the-meaning-of-cryptographic-nonce, Erişim tarihi:01.08.2022

Güven, V., & Sahinöz, E. (2018). Blokzincir Kripto Paralar Bitcoin.

Handbook: National spectrum management (2005 ed.). (2005). ITU.

Harari, Y. N. (2015). Hayvanlardan Tanrılara: Sapiens : İnsan Türünün Kısa Bir Tarihi.

Hatfield, D. N., & Weiser, P. (2006). Toward property rights in spectrum: The difficult policy choices ahead. SSRN Electronic Journal, 3. https://doi.org/10.2139/ssrn.975679

Head [Silver Coin]. (1901). British Museum, Birleşik Krallık. https://www.britishmuseum.org/collection/object/C_1901-0407-157

Henderson, R. M., & Clark, K. B. (1990). Architectural innovation: The reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms. Administrative Science Quarterly, 35(1), 9. https://doi.org/10.2307/2393549

Hoang, H. D., Duy, P. T., & Pham, V. (2019). A security-enhanced monitoring system for northbound interface in SDN using blockchain. Proceedings of the Tenth International Symposium on Information and Communication Technology - SoICT 2019, 197-204. https://doi.org/10.1145/3368926.3369709

How does bitcoin mining work? (2017, October 17). Investopedia. Retrieved August 2, 2022, from https://www.investopedia.com/tech/how-does-bitcoin-mining-work/

Hughes, L., Dwivedi, Y. K., Misra, S. K., Rana, N. P., Raghavan, V., & Akella, V. (2019). Blockchain research, practice and policy: Applications, benefits, limitations, emerging research themes and research agenda. International Journal of Information Management, 49, 114-129. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.02.005

IEEE. (2005, February). Regulatory and Policy Issues Approaches to Spectrum Sharing. IEEE Communications Magazine, 10-12.

ITU. (2008). Spectrum Sharing. 8th Global Symposium for Regulators. https://www.itu.int/ITU-D/treg/Events/Seminars/GSR/GSR08/discussion_papers/Spectrum_Sharing_web.pdf

ITU. (2010). Guidelines for the transition from analogue to digital broadcasting. https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/hdb/D-HDB-GUIDELINES.01-2010-R1-PDF-E.pdf

ITU. (2010, February). The digital dividend: opportunities and challenges. ITU News, 27-30.

ITU. (2010, January 12). Module 5. Radio spectrum management. Paperzz.com. Retrieved July 18, 2022, from https://paperzz.com/doc/6813286/module-5.-radio-spectrum-management

ITU. (2012). Digital Dividend: Insights for Spectrum Decisions. https://www.itu.int/en/ITU-D/Spectrum-Broadcasting/Documents/Publications/DigitalDividend_Edition2012.pdf

ITU. (n.d.). About ITU. ITU. Retrieved July 20, 2022, from https://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx

ITU. (n.d.). Mission statement. ITU. Retrieved July 20, 2022, from https://www.itu.int/en/ITU-R/information/Pages/mission-statement.aspx

ITU. (n.d.). Regulatory publications. ITU. Retrieved July 20, 2022, from https://www.itu.int/pub/R-REG

ITU. (n.d.). World Radiocommunication Conferences *(WRC)*. Retrieved July 20, 2022, from https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/Pages/default.aspx

ISM bands around the world. (2022, June 7). Altium. Retrieved August 12, 2022, from https://resources.altium.com/p/ism-bands-around-world

ITU, InfoDev, & The World Bank. (2014). *ICT Regulation Toolkit*.

ITU. (2016). Economic aspects of spectrum management (Report ITU-R SM.2012-5). https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2012-5-2016-PDF-E.pdf

ITU. (2016). Economic aspects of spectrum management (SM.2012-5).
Kaur, M. J., Uddin, M., & Verma, H. K. (2012). QoS Provisioning of Cognitive Radio using Soft Computing Techniques– A Survey. International Journal of Computational Intelligence and Information Security, 3(5), 51-63.
Kelly, T., & Rossotto, C. M. (2012). Broadband strategies handbook. World Bank Publications.
Khan, M. A., Jamali, M. M., Maksymyuk, T., & Gazda, J. (2020). A blockchain token-based trading model for secondary spectrum markets in future generation mobile networks. Wireless Communications and Mobile Computing, *2020*, 1-12. https://doi.org/10.1155/2020/7975393
Klasik Rant Kuramları. (t.y.). Ekodialog.com. https://www.ekodialog.com/kent-ekonomileri/klasik-rant-kuramlari-ricardo.html#:~:text=Ricardo'nun%20Toprak%20Rant%C4%B1%20Kuram%C4%B1,kuram%C4%B1%20da%20denilmektedir(5) , Erişim tarihi:26.07.2022
Kostal, K., Krupa, T., Gembec, M., Veres, I., Ries, M., & Kotuliak, I. (2018). On transition between pow and POS. 2018 International Symposium ELMAR, 207-210. https://doi.org/10.23919/elmar.2018.8534642
Kotobi, K., & Bilen, S. G. (2018). Secure blockchains for dynamic spectrum access: A decentralized database in moving cognitive radio networks enhances security and user access. IEEE Vehicular Technology Magazine, *13*(1), 32-39. https://doi.org/10.1109/mvt.2017.2740458
Kroll, J. A., Davey, I. C., & Felten, E. W. (2013). The Economics of Bitcoin Mining, or Bitcoin in the Presence of Adversaries. In The Twelfth Workshop on the Economics of Information Security (WEIS 2013).
Ku, H. (2003). Curing vinyl ester particle-reinforced composites using microwaves. Journal of Composite Materials, 37(22), 2027-2042. https://doi.org/10.1177/0021998303036266
Kuzu, L. (t.y.). TV Yayın Teknolojileri ve Türkiye. https://www.emo.org.tr/. https://www.emo.org.tr/ekler/b81dbab3fac2b08_ek.pdf, Erişim tarihi:21.07.2022
Lasla, N., Al-Sahan, L., Abdallah, M., & Younis, M. (2022). Green-pow: An energy-efficient blockchain proof-of-Work consensus algorithm. Computer Networks, 214. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109118
Lavender, T., & Hogg, T. (2015). Licensed shared access. UK Spectrum Policy Forum. https://www.slideshare.net/TechUK/licensed-shared-access-a-report-for-the-uk-spectrum-policy-forum
Lie, E. (2004). Background Paper: Radio Spectrum Management for a Converging World. ITU. https://www.itu.int/osg/spu/ni/spectrum/RSM-BG.pdf
Lin Xu, Tonjes, R., Paila, T., Hansmann, W., Frank, M., & Albrecht, M. (2000). Drive-ing to the internet: Dynamic radio for IP services in vehicular environments. Proceedings 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. LCN 2000, 281-289. https://doi.org/10.1109/lcn.2000.891040
Lin, P., Jia, J., Zhang, Q., & Hamdi, M. (2011). Dynamic Spectrum Sharing With Multiple Primary and Secondary Users. *IEEE* Transactions On Vehicular Technology, *60*(4), 1756-1765. https://doi.org/10.1109/icc.2010.5502744
Litke, A., Anagnostopoulos, D., & Varvarigou, T. (2019). Blockchains for supply chain management: Architectural elements and challenges towards a global scale deployment. Logistics, *3*(1), 5. https://doi.org/10.3390/logistics3010005
Luther, W. (2003). Spectrum management in the global village. 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC '03. https://doi.org/10.1109/icsmc2.2003.1428996

Malki, A., & Weiss, M. B. (2016). Automating ex-post enforcement for spectrum sharing: A new application for block-chain technology. SSRN Electronic Journal. https://doi.org/10.2139/ssrn.2754111

Malmo, C. (2017, November 1). One bitcoin transaction consumes as much energy as your house uses in a week. VICE - VICE is the definitive guide to enlightening information. Retrieved August 2, 2022, from https://www.vice.com/en/article/ywbbpm/bitcoin-mining-electricity-consumption-ethereum-energy-climate-change

Matinmikko, M., Latva-aho, M., Ahokangas, P., & Seppänen, V. (2018). On regulations for 5G: Micro licensing for locally operated networks. Telecommunications Policy, 42(8), 622-635. https://doi.org/10.1016/j.telpol.2017.09.004

Mayer, R. C., Davis, J. H., & Schoorman, F. D. (1995). An İntegrative Model of Organizational Trust. The Academy of Management Review, 20(3), 709. https://doi.org/10.2307/258792

Melody, W. H., & Lemstra, W. (2011). Liberalization in radio spectrum management. International Handbook of Network Industries, 123-143. https://doi.org/10.4337/9780857930477.00014

Metaswitch. (n.d.). What is the citizens broadband radio service (CBRS)? Metaswitch | Cloud Native Communications Software. Retrieved August 11, 2022, from https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-the-citizens-broadband-radio-service-cbrs

Mikerov, A. (2014, February). From history of Electrical Engineering III: Electromagnetism discovery and its fundamental laws in the first half of 19-th century [Paper presentation]. 2014 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference(ElConRusNW). https://www.researchgate.net/publication/271544274_From_history_of_Electrical_Engineering_III_Electromagnetism_discovery_and_its_fundamental_laws_in_the_first_half_of_19-th_century#pf2

Mitola, J. (1999). Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications. 1999 IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC'99) (Cat. No.99EX384), 3-10. https://doi.org/10.1109/momuc.1999.819467

Monrat, A. A., Schelen, O., & Andersson, K. (2019). A survey of blockchain from the perspectives of applications, challenges, and opportunities. *IEEE* Access, 7, 117134-117151. https://doi.org/10.1109/access.2019.2936094

Morgül, A. (2011). Sayısal Televizyon Tekniği. Papatya Yayıncılık Eğitim.

Mustonen, M., Matinmikko, M., Roberson, D., & Yrjölä, S. (2014). Evaluation of recent spectrum sharing models from the regulatory point of view. Proceedings of the 1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity, 11-16. https://doi.org/10.4108/icst.5gu.2014.258121

Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. https://bitcoin.org/bitcoin.pdf

Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., & Goldfeder, S. (2016). Bitcoin and cryptocurrency technologies: A comprehensive introduction. Princeton University Press.

National Aeronautics and Space Administration. (2013, March). Electromagnetic spectrum - Introduction. Imagine the Universe!. Retrieved July 5, 2022, from https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html

National Institute of Standards and Technology. (2022, April 5). Spectrum Sharing. NIST. Retrieved July 25, 2022, from https://www.nist.gov/advanced-communications/spectrum-sharing#:~:text=Spectrum%20sharing%20is%20a%20way,demand%20is%20crowding%20the%20airwaves

OFCOM. (2017). 5G spectrum access at 26 GHz and update on bands above 30 GHz. https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0014/104702/5G-spectrum-access-at-26-GHz.pdf

Office of Communications-OFCOM. (2007). Digital Dividend Review: A statement on our approach to awarding the digital dividend. Office of Communications. https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0018/33615/statement.pdf

Paçacı, K. P., Seçki, A., & Pençereci, Ş. Y. (2011). Düzenleyici Kurumların Sayısal Yayıncılıkta Rolü. https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/slug/duzenleyici-kurumlarin-sayisal-yayincilikta-rolu.pdf

Panda, S. K., Jena, A. K., Swain, S. K., & Satapathy, S. C. (2021). Blockchain technology: Applications and challenges. Springer Nature. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-69395-4

Pappa, P. C., Sarbhai, A., Baset, A., Kasera, S., & Buddhikot, M. (2020). Spectrum sharing in CBRS using blockchain. 2020 IEEE 17th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS), 631-639. https://doi.org/10.1109/mass50613.2020.00082

Permissionless blockchain vs Permissioned blockchain - What's your pick? (2021, September 6). Akeo. Retrieved August 2, 2022, from https://akeo.tech/blog/blockchain-and-dlt/permissionless-permissioned-blockchain/

Patil, V. M., & Patil, S. R. (2016, September). A survey on spectrum sensing algorithms for cognitive radio [Paper presentation]. International Conference on Advances in Human Machine Interaction (HMI - 2016), Jalappa Institute of Technology, Doddaballapur, Bangalore, India.

PGP Corporation. (2002). An Introduction to Cryptography .

President's Council of Advisors on Science and Technology. (2012). Report to the president: Realizing the full potential of government-held spectrum to spur economic growth. https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast_spectrum_report_final_july_20_2012.pdf

Priemer, R. (1991). Introductory signal processing. World Scientific. https://books.google.com.tr/books?id=QBT7nP7zTLgC&pg=PA1&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Qiu, J., Grace, D., Ding, G., Yao, J., & Wu, Q. (2020). Blockchain-based secure spectrum trading for unmanned-aerial-Vehicle-Assisted cellular networks: An operator’s perspective. IEEE Internet of Things Journal, 7(1), 451-466. https://doi.org/10.1109/jiot.2019.2944213

Radio Spectrum Policy Group. (n.d.). Draft RSPG Opinion on Strategic Challenges facing Europe in addressing the Growing Spectrum Demand for Wireless Broadband. European Commission. https://circabc.europa.eu/sd/a/9367e691-df81-408c-a17e-ef895449bd7f/RSPG13-511_Rev1_Draft%20Opinion%20Wireless%20Broadband.pdf

Radyo ve Televizyon Üst Kurulu. (2012). Türkiye Karasal Sayısal Televizyon (DVB-T2) Ulusal Frekans Planı. https://arsivdosya.rtuk.gov.tr/assets/Icerik/AltSiteler/karasal-sayisal-televizyon-dvb-t2-ulusal-frekans-plani.pdf

Raman, C., Yates, R., & Mandayam, N. (2005). Scheduling variable rate links via a spectrum server. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. https://doi.org/10.1109/dyspan.2005.1542624

Rancy, F., Zilles, E., & Guitot, J. J. (2011). Transition to Digital TV and Digital Dividend. In Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TELSIKS) (pp. 13-20).

Rauchs, M. (2019). Distributed Ledger technology systems: A conceptual framework.

Rehmani, M. H. (2021). Blockchain systems and communication networks: From concepts to implementation. Springer Nature.

Report on Collective Use of Spectrum (CUS) and other spectrum sharing approaches (RSPG11-392). (2011). RADIO SPECTRUM POLICY GROUP. https://rspg-spectrum.eu/wp-content/uploads/2013/05/rspg11_392_report_CUS_other_approaches_final.pdf

Resmi Gazete. (2006). *Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013)*. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2021/12/Dokuzuncu_Kalkinma_Plani-2007-2013.pdf

Rosston, G. L., & Steinberg, J. S. (1997). Using Market-Based Spectrum Policy to Promote the *Public Interest.* Federal Communications Law Journal, 50*(1)*, 88-116. https://www.repository.law.indiana.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1147&context=fclj

Sarmah, S. S. (2018). Understanding Blockchain Technology. Computer Science and Engineering, 8(2), 23-29. https://doi.org/10.5923/j.computer.20180802.02

Sayısal Tv Yayınları. (t.y.). Retrieved July 22, 2022, from https://diyot.net/sayisal-tv-yayinlari/

Schwap, A. J., & Fischer, P. (1998, July). Maxwell, Hertz, and German radio-wave history. Proceedings of the IEEE, 86(7), 1312-1318. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/681365

Selek, Y. K., Ilhan, E., & Yayla, F. (2010). Esnek Spektrum Yönetimi: Spektrum İhaleleri ve Spektrum Ticareti. btk.gov.tr/uploads/pages/slug/esnek-spektrum-yonetimi-spektrum-ihaleleri-ve-spektrum-ticareti.pdf

Sengul, C. (2020). Distributed ledgers for spectrum authorization. IEEE Internet Computing, *24*(3), 7-18. https://doi.org/10.1109/mic.2020.2999024

Sengupta, D. L., & Sarkar, T. K. (2003, April). Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the Early History of Electromagnetic Waves. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 45(2), 13-19. https://www2.unifap.br/rsmatos/files/2013/10/Hertz_Maxwell_history.pdf

Shiomi, T., & Hatori, M. (2000). Digital Broadcasting. IOS Press.

Stine, J. A., & Portigal, D. L. (2004). An introduction to spectrum management (MTR 04W0000048). Mitre Corporation. https://mitre.org/sites/default/files/pdf/04_0423.pdf

Siddique, M. M., Könsgen, A. J., Görg, C., Hiertz, G. R., & Max, S. (2006, April). Extending IEEE 802.11 by DARPA XG Spectrum Management: A Feasibility Study [Paper presentation]. In Proc 12th European Wireless Conference, Athens, Greece. https://www.researchgate.net/publication/259802383_Extending_IEEE_80211_by_DARPA_XG_spectrum_management_A_feasibility_study

Song, S., Rey-Moreno, C., & Jensen, M. (2019). Innovations in Spectrum Management Enabling community networks and small operators to connect the unconnected. Associations for Progressive Communications. https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2019/03/InnovationsinSpectrumManagement_March2019-EN-1.pdf

Sunyaev, A. (2020*).* Internet computing: Principles of distributed systems and emerging internet-based technologies. Springer Nature.

TA1LSX. (2019, February 13). ITU regions and map. Retrieved July 21, 2022, from https://www.ta1lsx.com/itu-regions-and-map/

Tabak, Ş. (2002). Elektronik Para ve Merkez Bankacılığı. https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/f0f03ed2-1ea3-4858-aeb3-383eb724b961/suleseneltabak.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE-f0f03ed2-1ea3-4858-aeb3-383eb724b961-m3fB9PM

The future of the bitcoin ecosystem and “Trustless trust” – Why I invested in Blockstream. (2014, November 17). LinkedIn. Retrieved August 1, 2022, from https://www.linkedin.com/pulse/20141117154558-1213-the-future-of-the-bitcoin-ecosystem-and-trustless-trust-why-i-invested-in-blockstream

The invisible politics of bitcoin: Governance crisis of a decentralised infrastructure. (2016, September 30). Internet Policy Review. Retrieved August 2, 2022, from https://policyreview.info/articles/analysis/invisible-politics-bitcoin-governance-crisis-decentralised-infrastructure

The magic of mining. (2015, January 8). The Economist. Retrieved August 2, 2022, from https://www.economist.com/business/2015/01/08/the-magic-of-mining

Token nedir? (t.y.). https://www.coinbase.com/tr/learn/crypto-basics/what-is-a-token. Retrieved August 10, 2022, from https://www.coinbase.com/tr/learn/crypto-basics/what-is-a-token

Tuna, E., & Karagöz, M. (2012). Gelecek Nesil Ağlar için Spektrum Tahsisinde Yeni Bir Yaklaşım: Bilişsel Radyo. International Journal of Engineering Research and Development, 4*(1), 25*-32. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/353470

Türk Haber Portalı. (2022, January 25). Rant Ne Demek? https://ajans66.com/ilginc/rant-ne-demek.html#:~:text=Rant%20(i.%20)%20i.,i%C3%A7inde%20emek%20verilmeden%20sa%C4%9Flad%C4%B1%C4%9F%C4%B1%20gelir, Erişim tarihi:26.07.2022

Ünal, E., & Kocaoğlu, Ö. (2018). Blok Zinciri Teknolojisi: Kullanım Alanları, Açık Noktaları ve Gelecek Beklentileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *13*, 54-64. https://doi.org/10.31590/ejosat.423676

Varlıkların token Haline Getirilmesi. (t.y.). HALKBANK - TÜRKİYE HALK BANKASI. https://www.halkbank.com.tr/content/halkbank/tr/blog/finans/Varliklarin-Token-Haline-Getirilmesi.html#:~:text=Varl%C4%B1klar%C4%B1n%20token%20haline%20getirilmesi%20bir,her%20varl%C4%B1%C4%9F%C4%B1%20dijitalize%20etmek%20demektir, Erişim tarihi:11.08.2022

Veritabanı nedir? (t.y.). Oracle | Cloud Applications and Cloud Platform. Retrieved July 28, 2022, from https://www.oracle.com/tr/database/what-is-database/

Weiss, M. B., Werbach, K., Sicker, D. C., & Bastidas, C. E. (2019). On the application of blockchains to spectrum management. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 5*(2), 193-205*. https://doi.org/10.1109/tccn.2019.2914052

Werbach, K. (2018). The Blockchain and the New Architecture of Trust. MIT Press. Werbach, K. (2021). Blokzincir ve Yeni Güven Mimarisi (A.Usta, Çev). Koç Üniversitesi Yayınları. (Orijinal Baskı, 2018)

What is bitcoin halving? Definition, how it works, why it matters. (2020, May 5). Investopedia. Retrieved January 25, 2023, from https://www.investopedia.com/bitcoin-halving-4843769#toc-what-is-bitcoin-halving

What is a gateway? Definition from WhatIs.com. (2019, June 6). IoT Agenda. Retrieved August 10, 2022, from https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/gateway#:~:text=A%20gateway%20is%20a%20network,gateway%20prior%20to%20being%20routed

What is an Oracle in blockchain? » explained. (2022, April 7). Blockchain Oracles for Hybrid Smart Contracts | Chainlink. Retrieved August 10, 2022, from https://chain.link/education/blockchain-oracles

What is CBRS? How it Works & Why Your Enterprise Should Care. (2022, August 11). Private 5G LANs for the Enterprise. Retrieved August 11, 2022, from https://www.celona.io/cbrs/what-is-cbrs

What is Cryptocurrency Difficulty? (2018, January 30). Investopedia. Retrieved August 1, 2022, from https://www.investopedia.com/terms/d/difficulty-cryptocurrencies.asp

What is Electromagnetic Waves? Definition of Electromagnetic Waves, Electromagnetic Waves Meaning. (n.d.). The Economic Times. Retrieved July 4, 2022, from https://economictimes.indiatimes.com/definition/electromagnetic-waves

What is Timestamp? (2022, March 23). Bit2Me Academy. Retrieved November 24, 2021, from https://academy.bit2me.com/en/blockchain-timestamp/

Wireless Innovation Forum. (2017). Requirements for Commercial Operation in the U.S. 3550-3700 MHz Citizens Broadband Radio Service Band.

https://winnf.memberclicks.net/assets/work_products/Specifications/WINNF-TS-0112-V1.0.0%20CBRS%20Operational%20and%20Functional%20Requirements.pdf
Wood, G. (n.d.). Ethereum: A Secure Decentralısed Generalısed Transactıon Ledger. https://gavwood.com/paper.pdf
World Bank Group. (2017). Distributed Ledger Technology (DLT) and Blockchain.
Yalçıntaş, M. (2015). Ekonomik Karar Almada Adalet Ve Oyun Teorisi. Maliye Finans Yazıları, 1(103), 247-273. https://doi.org/10.33203/mfy.307968
Yiğit, Y. (2012). Sayısal Karasal Televizyon Yayıncılığının Planlanmasına İlişkin Kriterler. Radyo ve Televizyon Üst Kurulu.
Yrjölä, S. (2018). Analysis Of Blockchain Use Cases İn The Citizens Broadband Radio Service Spectrum Sharing Concept. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, 128-139. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76207-4_11
Yu, H., Yang, Z., & Sinnott, R. O. (2019). Decentralized Big Data Auditing For Smart City Environments Leveraging Blockchain Technology. IEEE Access, 7, 6288-6296. https://doi.org/10.1109/access.2018.2888940
Zamblé, R., Gbégbé, R., Kadjo, J., Asseu, O., & Brou, P. (2016). Dynamic Spectrum Access Protocol For The Digital Dividend. Circuits and Systems, 07(13), 4124-4144. https://doi.org/10.4236/cs.2016.713340
Zhang, Y., & Årvidsson, A. (2012). Understanding The Characteristics Of Cellular Data Traffic. Proceedings of the 2012 ACM SIGCOMM Workshop On Cellular Networks: Operations, Challenges, and Future Design - CellNet '12, 13-18. https://doi.org/10.1145/2342468.2342472
Zhao, Q., & Sadler, B. M. (2007, May). A Survey of Dynamic Spectrum Access. IEEE Signal Processing Magazine, 07, 79-89.
Zheng, Z., Dai, H., Fu, X., & Chen, B. (2020). Blockchain and Trustworthy Systems: Second International Conference, BlockSys 2020, Dali, China, August 6–7, 2020, revised selected papers. Springer.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı ve Soyadı : Zeynep Nur BAHADIR

E-Posta Adresi : zeynepbahadir@rtuk.gov.tr

İş Deneyimi :

Unvan	**Görev Yeri**	**Yıl**
Üst Kurul Uzman Yardımcısı	Radyo ve Televizyon Üst Kurulu	2019 - …

Akademik Bilgiler

Öğrenim Durumu:

Derece	**Bölüm/Program**	**Üniversite**	**Yıl**
3.17	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	2013 - 2018

RTÜK