



**SEYREK KOD ÇOKLU ERİŞİM SİSTEMLERİNDE SIKIŞTIRILMIŞ  
ALGILAMA TABANLI ÇOKLU KULLANICI SEZİMİ**

**Mehmet Hakan DURAK**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2021**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- 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 çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet Hakan DURAK

21/06/2021

# SEYREK KOD ÇOKLU ERİŞİM SİSTEMLERİNDE SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA TABANLI ÇOKLU KULLANICI SEZİMİ

(Doktora Tezi)

Mehmet Hakan DURAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

## ÖZET

Mevcut dik çoklu erişim teknikleri yeni nesil haberleşme teknolojilerinin gereksinimlerini yeterince karşılamadığı için dik olmayan çoklu erişim teknikleri geliştirilmiştir. Aynı zaman-frekans kaynakları üzerinden birden fazla kullanıcının iletişim kurması fikrine dayanan dik olmayan çoklu erişim tekniklerinden seyrek kod çoklu erişim yönteminin seyrek kod kitapları ve optimale yakın performansına sahip alıcısı ile özellikle makine tipi haberleşmesinde kullanılması öngörülmektedir. Fakat kitlesel makine tipi haberleşme ve nesnelerin interneti ile kullanıcı sayısı yakın gelecekte çok fazla artacaktır. Seyrek kod çoklu erişim tekniğinin alıcısı olan mesaj geçiren algoritma; kullanıcı sayısı arttıkça karmaşıklığı üstel olarak artan bir yapıya sahiptir. Ayrıca makine tipi haberleşmesinde kullanıcıların yalnızca küçük bir kısmı aktif olarak sistemi kullanmaktadır. Dolayısıyla seyrek bir yapı olduğu söylenebilir. Aktif olan kullanıcıların tespit edilip bu kullanıcıların verilerinin çözümlenmesi işlem yükünü azaltmaktadır. Bahsedilen bu gerekçelerden yola çıkarak tez kapsamında alıcı yapısının karmaşıklığını azaltmaya yönelik ve aktif kullanıcıları sezip kanal kestirimi yapmaya yönelik iki yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen ilk yöntemde sıkıştırılmış algılama teorisi kullanılarak alıcı yapısı MPA'ya ek olan bir yöntem önerilmiştir. Birkaç yinelemenin gerçekleştiği birincil sezimden sonra oluşan seyrek hatalar sıkıştırılmış algılama teorisi kullanılarak yeniden oluşturulmuştur. Bu yöntemle daha az yineleme sayısı ile alıcının performansı artırılmıştır. Geliştirilen ikinci yöntemde de sıkıştırılmış algılama teorisinden yararlanarak dinamik ve seyrekliğe uyarlamalı bir aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem sıkıştırılmış algılama alanındaki önemli yöntemlerle kıyaslandığında seyrekliğin yüksek olduğu durumlarda en iyi performansa sahiptir. Seyreklik ön bilgisine ihtiyaç duymaması ile yöntem uygulanabilir.

Bilim Kodu : 90523

Anahtar Kelimeler : Seyrek kod çoklu erişim, makine tipi haberleşme, yukarı yönlü bağlantılı izinsiz iletişim, sıkıştırılmış algılama, çoklu kullanıcı sezimi, aktif kullanıcı sezimi, kanal kestirimi

Sayfa Adedi : 108

Danışman : Doç. Dr. Özgür ERTUĞ

COMPRESSED SENSING BASED MULTIUSER DETECTION FOR SPARSE CODE  
MULTIPLE ACCESS

(Ph. D. Thesis)

Mehmet Hakan DURAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

Since the current orthogonal multiple access techniques do not fulfill the requirements of the new generation communication technologies, non-orthogonal multiple access techniques have been developed. Sparse code multiple access, which is one of the non-orthogonal multiple access techniques based on the idea of transmit with more users over the same time-frequency resources, is estimated to be used especially in machine type communication with sparse codebooks and receiver with near-optimal performance. But with massive machine-type communications and the internet of things, the number of users will increase enormously in the near future. Message passing algorithm, which is the receiver of the sparse code multiple access technique; it has a structure whose complexity increases exponentially as the number of users increases. In addition, only a small part of the users actively use the system in machine-type communication. Therefore, it can be said that there is a sparsity, as only a small part of all users are active in a time slot. Active user detection and analyzing the data of these users reduces the computational load. Based on these reasons, two methods have been developed to reduce the complexity of the receiver structure and to detect active users and estimate the channel. In the first method developed, a method in addition to the receiver structure MPA was proposed by using the compressed sensing theory. Sparse errors that occur after initial detection, where several iterations occur, are reconstructed using compressed sensing theory. The performance of the receiver is increased with less number of iterations with this method. In the second method developed, an active user detection and channel estimation method that is dynamic and adaptive to sparsity has been developed by using the compressed sensing theory. The developed method has the best performance in cases where the sparsity is high compared to the important methods based on compressed sensing. The method is applicable as it does not need prior sparsity knowledge.

Science Code : 90523

Key Words : Sparse code multiple access, machine type communication, uplink grant-free transmission, compressed sensing, multiuser detection, active user detection, channel estimation

Page Number : 108

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Özgür ERTUĞ

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim sırasında katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Özgür ERTUĞ hocama teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmalarım boyunca değerli fikirleriyle tezime katkı sunan Prof. Dr. Cenk TOKER ve Prof. Dr. Erkan AFACAN hocalarıma, değerli katkıları ve yönlendirmeleri için değerli hocam Prof. Dr. Markku JUNTTI'ye (University of Oulu, FINLAND) teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez çalışmalarımı destekleyen ve teşvik eden TÜBİTAK 2211-C Yurt İçi Lisansüstü Burs Programına teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın her anında en büyük destekçim olarak yanımda olan ve hayatını bizlere adayan sevgili annem Semra DURAK'a ve sevgili babam Ömer DURAK'a en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bu süreçte hiçbir zaman desteğini esirgemeyen ve sabırlarından dolayı değerli eşim Gizem DURAK'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇOKLU ERİŞİM TEKNİKLERİ.....	17
2.1. Dik Çoklu Erişim Teknikleri (OMA).....	18
2.1.1. Frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA).....	18
2.1.2. Zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA).....	19
2.1.3. Kod bölmeli çoklu erişim (CDMA).....	20
2.1.4. Dik frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA).....	21
2.2. Dik Olmayan Çoklu Erişim Teknikleri (NOMA) .....	22
2.2.1. Güç eksenli NOMA (PD-NOMA) .....	22
2.2.2. Çok kullanıcılı paylaşımlı erişim (MUSA).....	24
2.2.3. Serpiştirme bölmeli çoklu erişim (IDMA).....	25
2.2.4. Düşük yoğunluklu yayılım (LDS).....	26
2.2.5. Örüntü bölmeli çoklu erişim (PDMA).....	27
2.2.6. Seyrek kod çoklu erişim (SCMA).....	27
3. SEYREK KOD ÇOKLU ERİŞİM (SCMA) .....	29
3.1. Sistem Modeli.....	30

	<b>Sayfa</b>
3.1.1. Çoklu Erişim Yöntemi.....	30
3.1.2. SCMA kod kitabı haritalama.....	31
3.1.3. Çarpan grafiği gösterimi.....	34
3.1.4. Çoklu kullanıcı sezimi.....	35
<b>4. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA TABANLI KABLOSUZ HABERLEŞME .....</b>	<b>41</b>
4.1. Giriş .....	41
4.2. Sıkıştırılmış Algılama.....	44
4.2.1. Seyreklik.....	45
4.2.2. Algılama ve tutarsızlık tanımı.....	46
4.2.3. Kısıtlı izometri özelliği .....	47
4.2.4. Yeniden oluşturma problemi .....	47
4.3. Yeniden Oluşturma Algoritmaları.....	49
4.3.1. MP algoritması .....	49
4.3.2. OMP algoritması .....	50
4.3.3. COSAMP algoritması .....	51
4.3.4. IHT algoritması .....	52
<b>5. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA TABANLI ÇOKLU KULLANICI SEZİMİ .....</b>	<b>55</b>
5.1. Giriş .....	55
5.2. Önerilen Yöntem .....	56
5.3. Performans Ölçümü.....	59
5.4. Değerlendirme Kriterleri .....	59
5.5. Karmaşıklık Analizi.....	59
5.6. Benzetim Çalışmaları .....	60

	<b>Sayfa</b>
5.7. Sonuç .....	68
<b>6. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA TABANLI AKTİF KULLANICI SEZİMİ VE KANAL KESTİRİMİ .....</b>	<b>71</b>
6.1. Giriş .....	71
6.2. Sistem Modeli.....	75
6.3. Önerilen Yöntem .....	79
6.4. Performans Ölçümü.....	86
6.5. Değerlendirme Kriterleri .....	86
6.6. Benzetim Çalışmaları .....	88
6.7. Sonuç .....	95
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>97</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>101</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>107</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. SCMA kod kitabı örneği .....	33
Çizelge 4.1. Uyumlu arayış algoritması.....	50
Çizelge 4.2. Dik uyumlu arayış algoritması.....	51
Çizelge 4.3. Sıkıştırılmış örnekleme uyumlu arayış algoritması.....	52
Çizelge 4.4. Yinelemeli sert eşikleme algoritması.....	52
Çizelge 5.1. CoSaMP tabanlı seyrek hata doğrulama algoritması.....	58
Çizelge 6.1. Önerilen DSACS-tabanlı AKS ve KK yöntemi.....	82
Çizelge 6.2. Benzetim çalışmaları parametreleri .....	86

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. 5G teknolojisi özellikleri .....	2
Şekil 1.2. OMA ve NOMA karşılaştırmalı gösterim .....	3
Şekil 2.1. Çoklu erişim teknikleri genel yapısı .....	17
Şekil 2.2. FDMA gösterimi.....	18
Şekil 2.3. TDMA gösterimi .....	19
Şekil 2.4. CDMA gösterimi .....	20
Şekil 2.5. OFDMA gösterimi.....	21
Şekil 2.6. İki kullanıcılı aşağı yönlü bağlantılı PD-NOMA sistemi .....	23
Şekil 2.7. Çok kullanıcı tarafından paylaşılan dört kaynaklı yukarı yönlü bağlantılı MUSA.....	24
Şekil 2.8. IDMA verici ve alıcı yapısı (K kullanıcı).....	25
Şekil 2.9. LDS-CDMA şeması (6 kullanıcı ve 4 alt taşıyıcı).....	26
Şekil 2.10. LDS-OFDM şeması .....	26
Şekil 2.11. Yukarı yönlü bağlantılı PDMA verici ve alıcı şeması.....	27
Şekil 2.12. SCMA kodlama gösterimi .....	27
Şekil 3.1. SCMA verici yapısı .....	30
Şekil 3.2. SCMA sistem modeli.....	31
Şekil 3.3. SCMA kod kitabı adresleme gösterimi.....	32
Şekil 3.4. Çarpan grafiği gösterimi (6 kullanıcı, 4 alt taşıyıcı).....	34
Şekil 3.5. SCMA alıcı yapısı.....	38
Şekil 4.1. Sıkıştırılmış algılama matematiksel gösterimi.....	46
Şekil 5.1. Önerilen CS-tabanlı yöntemin yapısı.....	56
Şekil 5.2. Önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi (yineleme sayısı =1).....	61

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.3. Önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi (yineleme sayısı =2).....	62
Şekil 5.4. Önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi (yineleme sayısı =3).....	63
Şekil 5.5. Önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi (yineleme sayısı =5).....	64
Şekil 5.6. Önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi (yineleme sayısı =7).....	65
Şekil 5.7. Farklı yineleme sayılarıyla önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi.....	66
Şekil 5.8. Orijinal MPA ve önerilen CS-tabanlı MPA algoritmasının farklı yineleme sayıları ile ortalama algılama süresi karşılaştırması .....	67
Şekil 6.1. İzin tabanlı ve izinsiz iletişimin gösterimi.....	71
Şekil 6.2. İzinsiz iletişim gösterimi.....	73
Şekil 6.3. Yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA sistem modeli (J potansiyel kullanıcı, A aktif kullanıcı).....	76
Şekil 6.4. Pasif kod kitabının sıfır takımı yıldız noktası ile gösterimi.....	78
Şekil 6.5. Önerilen DSACS-tabanlı AKS ve KK yöntemi .....	79
Şekil 6.6. Önerilen DSACS-tabanlı yöntemin farklı pilot uzunluklarında MDP performansı (aktif kullanıcı sayısı=6).....	88
Şekil 6.7. OMP, FOCUSS, DGOMP, CoSaMP ve önerilen DSACS-tabanlı yöntemin MDP-SNR performansı (aktif kullanıcı sayısı=6).....	89
Şekil 6.8. OMP, FOCUSS, DGOMP, CoSaMP ve önerilen DSACS-tabanlı yöntemin MDP-SNR performansı (aktif kullanıcı sayısı=10).....	90
Şekil 6.9. OMP, FOCUSS, DGOMP, CoSaMP ve önerilen DSACS-tabanlı yöntemin MDP performansının aktif kullanıcı sayısına göre değişimi (SNR=10).....	91
Şekil 6.10. Önerilen DSACS-tabanlı yöntemin farklı SNR'da MDP performansının aktif kullanıcı sayısına göre değişimi .....	92
Şekil 6.11. Önerilen DSACS-tabanlı yöntemin farklı SNR'larda FAP performansının aktif kullanıcı sayısına göre değişimi .....	93

**Şekil****Sayfa**

Şekil 6.12. OMP, FOCUSS, DGOMP, CoSaMP ve önerilen DSACS-tabanlı yöntemin MSE-SNR performansı (aktif kullanıcı sayısı=6) .....	94
--	----



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

**db**

Desibel

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

**1G**

1st Generation, 1. Nesil

**2G**

2nd Generation, 2. Nesil

**3G**

3rd Generation, 3. Nesil

**4G**

4th Generation, 4. Nesil

**5G**

5th Generation, 5. Nesil

**AKL**

Aktif Kullanıcı Listesi

**AKS**

Aktif Kullanıcı Sezimi

**AMI**

Average Mutual Information

**AUD**

Active User Detection, Aktif Kullanıcı Sezimi

**AWGN**

Additive White Gaussian Noise

**BER**

Bit Error Rate, Bit Hata Oranı

**BP**

Belief Propagation, İnanç Yayılımı

**BP**

Basis Pursuit

**BS**

Base Station, Baz İstasyonu

**CB**

Codebook, Kod Kitabı

**CDMA**

Code Division Multiple Access

**CD-NOMA**

Code Domain Noma, Kod Eksenli Noma

**CIR**

Channel Impulse Response

**COSAMP**

Compressive Sampling Matching Pursuit

**CS**

Compressed Sensing, Sıkıştırılmış Algılama

**CSI**

Channel State Information, Kanal Durum Bilgisi

**CTU**

Contention Transmission Unit, Çekişme İletim Birimi

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>DFG-MPA</b>	Dynamic Factor Graph-MPA
<b>DGOMP</b>	Detection Based Group Orthogonal Matching Pursuit
<b>DL</b>	Downlink, Aşağı Yönlü Bağlantı
<b>DMRS</b>	Demodulated Reference Signal
<b>DSACS</b>	Dynamic And Sparsity Adaptive Compressed Sensing
<b>DSM-GOMP</b>	Dynamic Sensing Matrix Based Gomp
<b>EM</b>	Expectation Maximization
<b>eMBB</b>	Enhanced Mobile Broadband
<b>ESE</b>	Elementary Signal Estimator, Basit Sinyal Kestiricisi
<b>EXIT</b>	Extrinsic Information Transfer
<b>FAP</b>	False Alarm Probability, Yanlış Alarm Olasılığı
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>FN</b>	Function Node, Fonksiyon Dügümü
<b>FOCUSS</b>	Focal Underdetermined System Solver
<b>GF</b>	Grant-Free, İzinsiz
<b>HARQ</b>	Hybrid Automatic Repeat Request
<b>HD</b>	Hard Decision
<b>HTC</b>	Human Type Communication, İnsan Tipi İletişim
<b>IDMA</b>	İnterleave Division Multiple Access
<b>IHT</b>	İterative Hard Thresholding
<b>ITU</b>	İnternational Telecommunication Union
<b>iid</b>	İdentically İndependently Distributed
<b>JMPA</b>	Joint Message Passing Algorithm
<b>KK</b>	Kanal Kestirimi
<b>LASSO</b>	Least Absolute Shrinkage And Selection Operator
<b>LDPC</b>	Low Density Parity Check Decoding
<b>LDS</b>	Low Density Spreading, Düşük Yoğunluklu Yayılım
<b>LLR</b>	Logarithm Likelihood Ratio
<b>LS</b>	Least Squares, En Küçük Kareler
<b>LTE</b>	Long Term Evolution

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>M2M</b>	Machine To Machine, Makineden Makineye
<b>MAP</b>	Maximum A Posteriori Probability
<b>MC-SCMA</b>	Multi Codebook-SCMA
<b>MDP</b>	Miss Detection Probability, Kaçırılan Sezim Olasılığı
<b>ML</b>	Maximum Likelihood, Maksimum Benzerlik
<b>mMTC</b>	Massive Machine Type Communication
<b>MP</b>	Matching Pursuit, Uyumlu Arayış
<b>MPA</b>	Message Passing Algorithm
<b>MPF</b>	Marginal Product Function
<b>MSE</b>	Mean Square Error, Ortalama Kareysel Hata
<b>MUD</b>	Multiuser Detection, Çoklu Kullanıcı Sezimi
<b>MUSA</b>	Multiuser Shared Access
<b>NOMA</b>	Nonorthogonal Multiple Access
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>OMA</b>	Orthogonal Multiple Access, Dik Çoklu Erişim
<b>OMP</b>	Orthogonal Matching Pursuit, Dik Uyumlu Arayış
<b>P2P</b>	Point To Point, Noktadan Noktaya
<b>PDMA</b>	Pattern Division Multiple Access
<b>PD-NOMA</b>	Power Domain Noma, Güç Eksenli Noma
<b>PEP</b>	Pairwise Error Probability
<b>QoS</b>	Quality of Service, Hizmet Kalitesi
<b>RAUD</b>	Refined-AUD
<b>RE</b>	Resource Elements, Kaynak Elemanı
<b>RF</b>	Radio Frequency, Radyo Frekans
<b>RIP</b>	Restricted Isometry Property, Kısıtlı İzometri Özelliği
<b>SBL</b>	Sparse Bayesian Learning, Seyrek Bayes Öğrenme
<b>SC</b>	Superposition Coding, Üst Düşüm Kodlama
<b>SCMA</b>	Sparse Code Multiple Access
<b>SD</b>	Sphere Decoding
<b>SER</b>	Symbol Error Rate, Sembol Hata Oranı
<b>SIC</b>	Successive Interference Cancellation

**Kısaltmalar****Açıklamalar****S-MPA**

Shuffled-MPA

**SS**

Spread Spectrum, Yayılı Spektrum

**TDMA**

Time Division Multiple Access

**UL**

Uplink, Yukarı Yönlü Bağlantı

**URLLC**

Ultra Reliable Low Latency Communication

**UWB**

Ultra White Band

**VB**

Variational Bayesian

**VN**

Variable Node, Değişken Düğüm

**ZC**

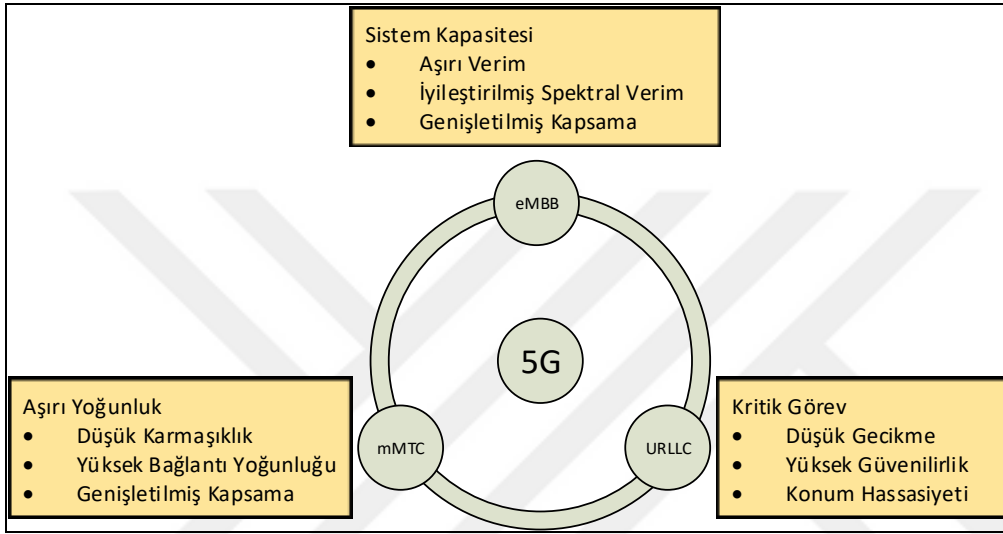
Zadoff Chu

## 1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile beraber kablosuz haberleşme sistemleri her geçen gün modern hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olmaktadır. Yeni nesil haberleşme teknolojileri ile birlikte yakın gelecekte daha fazla yaygınlaşacak olan makine tipi haberleşme, nesnelerin interneti, akıllı cihazlar, otonom sürüş, sanal ve artırılmış gerçeklik, akıllı şehir, akıllı enerji ağları, bulut bilişim, uzaktan ameliyat gibi uygulamaların mobil veri trafiğini devasa bir şekilde artırması öngörülmektedir. Ayrıca yeni nesil haberleşme sistemi olan beşinci nesil (fifth generation, 5G) ve ötesi haberleşme teknolojileri ile yüksek spektrum verimliliği, yüksek veri hızı ve düşük gecikme gibi farklı ihtiyaçlar ortaya çıkmıştır (H. Kim, Lim, Chae ve Hong, 2017).

Uluslararası telekomünikasyon birliği (ITU) ve 3GPP bağlı cihazların kullanım yerine göre çeşitliliği ve bunların çeşitli hizmet kalitesi (QoS) gereksinimlerini göz önünde bulundurarak üç ağ kullanım senaryosu tanımlamıştır. Bunlar; gelişmiş mobil geniş bant (enhanced Mobile Broadband - eMBB), kitlesel makine tipi iletişimi (mMTC) ve ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişimi (ultra reliable low latency communication, URLLC) olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi bu servislerin birbirlerinden farklılıkları mevcuttur. Bu servislerden eMBB; kullanıcı sayısının diğer servislere göre daha düşük olduğu senaryodur. Genellikle aşağı yönlü bağlantı (downlink, DL) olan ve veri boyutunun büyük olduğu insan tipi haberleşme (HTC) olarak adlandırılmaktadır. Fakat mMTC ve URLLC kullanım durumları HTC'den daha farklı özellikleri bulunmaktadır. Bunun yanında kritik tıbbi uygulamalarda, robot destekli ve artırılmış gerçeklik destekli ameliyatlarda kullanılacak URLLC için uçtan uca gecikmenin düşük olması ve veri güvenilirliğinin yüksek olması en önemli özelliklerdir. Ve bir diğer servis olan mMTC ise iletim olarak büyük ölçüde yukarı yönlü bağlantıya (uplink, UL) sahiptir. Veri boyutu oldukça küçük olup yüksek enerji verimliliği cihazların uzun ömürlü olması için gereklidir. Ayrıca iletişim kısmen veya tamamen otonom olup veri güvenilirliği ve gecikmeye karşı bir dereceye kadar toleransları vardır. Bu servisler ve özellikleri göz önüne alındığında mevcut iletişim teknolojilerinde önemli bir yükseltme yapılması gerektiği kaçınılmazdır (Shahab, Abbas, Shirvanimoghaddam ve Johnson, 2020).

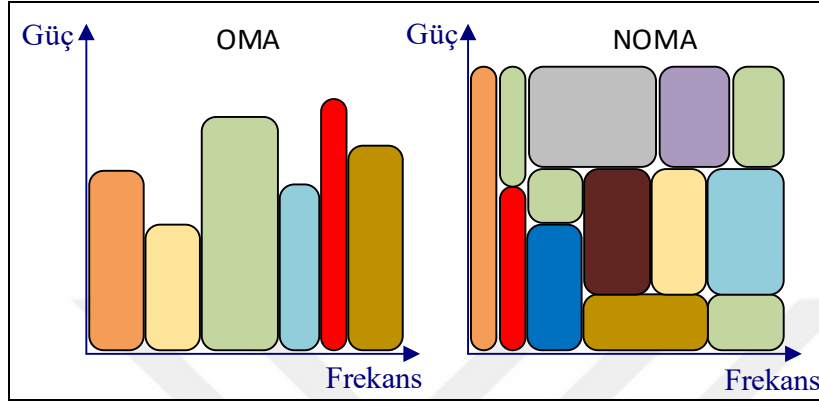
Makineden makineye (M2M) iletişim çeşidi olarak bilinen mMTC temelde insan müdahalesinin çok az olduğu veya hiç olmadığı iletişim çeşididir. Küresel ağ trendlerine göre CİSCO 2022 yılına kadar kablosuz ve mobil cihazların trafiği toplam IP trafiğinin yüzde 71'i olacağını belirtilmiştir. Aynı şekilde Ericsson iletişim ağlarına bağlı cihaz sayısının 2022'de 28 milyara ulaşacağını ve bu cihazların yüzde 53'ünden daha fazlasının MTC cihazları ve tüketici elektroniği olacağını belirtmiştir (Ericson, 2015).



Şekil 1.1. 5G teknolojisi özellikleri

Belirli zamanlarda kablosuz haberleşme alanındaki gelişmeler yeni nesil (örneğin 1G, 2G, 3G ve 4G) haberleşme teknolojisi olarak görülmüş ve çoklu erişim yöntemleri bu teknolojilerde önemli dönüm noktaları olmuştur. Frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA) yöntemi 1G 'de ses iletişimde, zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) yöntemi 2G'de ses ve veri iletişimde kullanılmıştır. Daha sonra mobil internet kullanımı ve video aramaları ile daha yüksek veri hızı ihtiyacı olmuş ve kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) yöntemi 3G'de kullanılmıştır. Belli bir zaman sonra CDMA'nın alıcı karmaşıklığı ve enerji verimliliği gerekliliklerinden dolayı dik frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA) yöntemi 4G olarak bilinen LTE (long term evolution)'de kullanılmıştır. Bu dik çoklu erişim (OMA) yöntemleri farklı şekillerde ve kaynaklarla her bir kullanıcıya dik kaynaklar tahsis etmektedir. Fakat kullanıcı sayısının artması ile birlikte zaman-frekans kaynakları sınırlı hale gelmekte ve her kullanıcı için ayrı bir kaynak tahsis edilmesi verimsizliğe sebep olmaktadır. Dahası kanal kodlarının gelişmesi, geleneksel noktadan noktaya (point to point, P2P) iletimi Shannon sınırlarının yakınlarına getirmiştir. Sonuç olarak mevcut çoklu erişim yöntemlerinin yeni teknolojilerle ortaya çıkan bu gereksinimleri tam olarak

karşılamayacağından spektral verimliliği artırmak için birden fazla kullanıcının paylaşılan kaynaklar içinde eşzamanlı olarak iletim yapmasına izin veren dik olmayan çoklu erişim (NOMA) yöntemleri önerilmiştir. Şekil 1.2.'de temsili olarak OMA ve NOMA yöntemlerinin karşılaştırmaları görülmektedir.



Şekil 1.2. OMA ve NOMA karşılaştırmalı gösterim

Şuana kadar geliştirilmiş olan çeşitli NOMA teknikleri mevcuttur. Bunlar temel olarak güç eksenli NOMA (power domain NOMA, PD-NOMA) (Yuya Saito, Yoshihisa Kishiyama, Anass Benjebbour, Takehiro Nakamura, Anxin Li, 2013) ve kod eksenli NOMA (code domain NOMA, CD-NOMA) olmak üzere 2 kategoriye ayrılmaktadır. Kod eksenli NOMA tekniklerinden bazıları çok kullanıcılı paylaşımlı erişim (multiuser shared access, MUSA) (Yuan ve diğerleri, 2016), serpiştirme bölmeli çoklu erişim (interleave division multiple access, IDMA) (Ping, Liu, Wu ve Leung, 2004), düşük yoğunluklu yayılım (low density spreading, LDS) (Hoshyar, Wathan ve Tafazolli, 2008), örüntü bölmeli çoklu erişim (pattern division multiple access, PDMA) (S. Chen ve diğerleri, 2017), seyrek kod çoklu erişim (sparse code multiple access, SCMA) (Nikopour ve Baligh, 2013) teknikleridir. Teknikler farklı olsa da, bu teknikler arasında ortak olan özellik; her bir kaynağa eşzamanlı olarak iletim yapan birden fazla kullanıcı olmasıdır. Detaylı olarak 2. ve 3. bölümde açıklanacak olan bu çoklu erişim yöntemleri genel hatlarıyla aşağıda açıklanmıştır.

PD-NOMA'da kullanıcıların tümü aynı frekans bandında iletim yaparken kullanıcılara ayrılan güçte kanal şartlarına göre farklılıklar bulunmaktadır. Böylelikle çoklu kullanıcı erişimi gerçekleştirilmektedir. OMA ile karşılaştırıldığında spektral verimliliğin artmasının yanında oldukça iyi performansa (sum rate, outage probability vs.) sahip olduğu görülmüştür (Z. Chen, Ding, Dai ve Zhang, 2017). Verici tarafta üst düşünme kodlama

(superposition coding, SC) kullanılırken alıcı tarafta ardışık girişim giderme (successive interference cancellation, SIC) tekniği kullanılmaktadır. Verici tarafında güç tahsisi yapılırken daha zayıf kanala sahip kullanıcıya daha büyük güç katsayısı, daha güçlü kanala sahip kullanıcıya daha düşük güç katsayısı ile kaynak tahsis edilir. Güç paylaşımından sonra her kullanıcı SC ile birleştirilerek iletim gerçekleştirilir. Alıcı tarafta ise SIC ile gelen sinyal ayrıştırılarak çoklu kullanıcı sezimi (multiuser detection, MUD) gerçekleştirilir. Bu özellikleriyle yakın gelecekte yeni nesil haberleşme teknolojilerinde aşağı yönlü bağlantıda aday çoklu erişim yöntemi olarak görülmektedir.

Kod eksenli NOMA kapsamında olan MUSA; CDMA'nın geliştirilmiş bir versiyonu olarak düşünülmektedir. Yukarı yönlü bağlantı MUSA'da kullanıcıların iletilen tüm sembolleri aynı yayma dizisi ile çarpılır. Burada önemli olan özellikler yayma dizileri düşük çapraz korelasyona (cross-correlation) sahip olması ve dizilerin  $\{-1, 0, 1\}$  olarak üretildiği için ikili tabanda olmamasıdır. Tüm semboller yayıldıktan sonra, OFDM alt taşıyıcıları gibi aynı zaman-frekans kaynakları üzerinden iletilir. Alıcı kısmında kullanıcıların verilerini kanal koşullarına göre ayırmak için SIC gerçekleştirilir. Aşağı yönlü MUSA'da ise kullanıcılar gruplara ayrılır ve kullanıcıların sembolleri farklı güç ölçekleri ile ağırlıklı olarak üst üste bindirilir.

Kod eksenli NOMA kapsamında olan bir diğer çoklu erişim tekniği IDMA'da; adımdan da anlaşılacağı üzere semboller yayma dizileri ile çarpıldıktan sonra yonga dizileri halinde serpiştirilir. Aynı şekilde alıcıda yine serpiştirme sayesinde ayrıştırılır. Bu haliyle IDMA; CDMA'nın yonga eklenmiş versiyonu olduğu söylenebilir. (H. Wu, Ping ve Perotti, 2006) Fakat IDMA ve CDMA kıyaslandığında %200 oranında kullanıcı yükü olan sistemlerde IDMA'nın 1 desibel (dB)'lik bir kazancının olduğu görülmektedir. Bu kazancın daha çok geleneksel bit serpiştirmeye kıyasla yonga dizilerinin serpiştirilmesinin daha fazla çeşitlilik kazancından kaynaklanmaktadır (L. Dai ve diğerleri, 2018).

LDS-CDMA; geleneksel CDMA'nın yoğun yayma dizisinin yerine düşük yoğunluklu yayılım sağlayan dizilere sahiptir. Bu diziler CDMA'da kullanılan dizilere kıyasla daha az sıfır olmayan eleman içerir ve seyrekler. Bu dizi tasarımı ile daha fazla kullanıcının birbirleri arasındaki girişimi azaltılır ve aşırı yüklenme ile daha fazla kullanıcı bulunabilir. Alıcı tarafta ise SIC veya mesaj geçiren algoritma (message passing algorithm, MPA) detektörleri kullanılır. LDS-OFDM ise LDS-CDMA ile OFDM'nin birleştirilmiş olduğu

bir varyant olarak düşünülebilir. Burada temel fark çoklu yol sönmemesi ile başa çıkmak için yonga dizileri yerine OFDM alt taşıyıcıları (subcarrier) kullanılmasıdır (L. Dai ve diğerleri, 2015).

Kod eksenli bir diğer yöntem olan PDMA spektral verimliliği kaybetmeden çeşitliliği sağlamak ve kullanıcılar arasındaki korelasyonu azaltmak için önerilen bir çoklu erişim yöntemidir. Çeşitlilik uzamsal, zamansal ve frekans alanındaki örüntülerle gerçekleşeceği gibi bu alanların birleşimi olan örüntülerle de gerçekleşebilir. Alıcıda sezim için SIC tabanlı MPA kullanılır.

Kod eksenli NOMA kapsamında olan bir diğer çoklu erişim yöntemi ise SCMA'dır. SCMA yöntemi 2013 yılında önerilmiş olan bir çoklu erişim yöntemidir. Aşırı yüklemeyi sağlamak için özellikleri itibarıyla LDS-CDMA'ya çok benzemektedir. LDS-CDMA'dan farklı olarak SCMA'da yayma ve haritalama süreçleri birleşiktir ve gelen sinyal her kullanıcıya özel olarak tahsis edilmiş seyrek kod kitaplarından seçilen kod sözcüklerine haritalanarak gönderilir. Farklı kullanıcılar için farklı katmanlar mevcut olup her katmanın kendine ait kod kitabı vardır. Çok boyutlu konstellasyon ile elde edilen kod kitapları şekil verme kazancı sağlamaktadır. Alıcıda yine benzer olarak maksimum benzerlik (maximum likelihood, ML) sezim performansına yakın başarımlı olan MPA kullanılmaktadır. Detaylı olarak 3. Bölümde anlatılacaktır.

Geliştirilen bu teknolojiler beraberinde yeni fikirler ve yeni yönelimleri de getirmiştir. Mevcut olarak IEEE 802.11 standardında da kullanılan geleneksel çekişme (contention) tabanlı iletişim mekanizmaları kullanıcıların veya bağlantı terminallerinin paket geldikten sonra iletim izni beklemeye gerek kalmadan veri iletmeye izin verir. Ancak, herhangi bir zamanda kablosuz ortamda yalnızca sınırlı sayıda kullanıcıyı destekleyebilir. Dik olmayan çoklu erişim teknikleri ile makine tipi haberleşmesi, nesnelerin interneti gibi yeni nesil haberleşme sistemleriyle beraber izinsiz (grant-free, GF) iletişimi ortaya çıkmıştır. Bu iletişim senaryosunda kullanıcılar herhangi bir istek/izin prosedürü olmadan iletişimlerini gerçekleştirebilmektedirler. Kullanıcılar zaman, frekans, kod kitapları ve pilotlardan oluşan önceden yapılandırılmış kaynaklarda veri iletebilir ve bu iletimi istek/izin prosedürü olmadan gerçekleştirebilirler.

Şuana kadar geliştirilmiş olan dik olmayan çoklu erişim tekniklerinin kullanım yerleri ve koşullarına göre farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Fakat özellikle yukarı

yönlü bağlantı için diğer yöntemlerle kıyaslandığında SCMA'nın daha az bit-hata oranı (bit-error rate, BER) değerine sahip olduğu görülmüştür (B. Wang, Wang, Lu, Xie ve Quan, 2015). Bu sebeple yeni nesil haberleşme teknolojilerinde kod alanı NOMA'da kullanılması muhtemel bir yöntem olduğu için tez kapsamında seyrek kod çoklu erişim (SCMA) yöntemi ele alınmıştır.

### Literatür İncelemesi

Literatürde SCMA'da çoklu kullanıcı sezimi ve aktif kullanıcı sezimi ile ilgili çeşitli yöntemler önerilmiştir. Çoklu kullanıcı sezimi için yapılan çalışmalar genel olarak kullanıcı sayısının artmasıyla alıcıda oluşan yüksek karmaşıklığı azaltmaya yöneliktir. Çoklu kullanıcı sezimi için yapılan çalışmaları yineleme sayısını azaltmaya yönelik yapılan çalışmalar (He, Bai, Feng, Xu ve Zhu, 2018; Yang, Ma ve Siu, 2017), karmaşık işlemleri mantıksal işlemlere dönüştürme fikrine dayanan çalışmalar (Han, Hu, Chen ve Lu, 2018), daha önceden bilinen ve doğru olarak kod çözümü yapılmış mesajların tekrar iletilmesi fikrine dayanan çalışmalar (Long, Chen, Guo ve Fang, 2016) olarak sınıflandırabiliriz.

Baicen Xiao, Kexin Xiao, Zhang, Chen, Xia ve Liu, (2015) tarafından yapılan çalışmada LDPC (low density parity check decoding) ile SCMA'nın birleştirilmiş algoritması sunulmuştur. MPA çıkışındaki veri alınarak LDPC çözücü (decoder) ile çözülerek karmaşıklığın azaltılması hedeflenmiştir.

Y. Wu, Zhang ve Chen, (2015) tarafından yapılan çalışmada yukarı bağlantı yönlü SCMA için kanal kodlamasını kullanan yinelemeli çok kullanıcılı bir alıcı tasarlanmıştır. Sistemdeki çeşitlilik (diversity) kazancı ve kodlama kazancını tam olarak kullanarak alıcı kısmındaki MPA'nın yineleme sayısını değiştirerek SCMA'nın performans analizi yapılmıştır. Önerilen yöntem ile sistemin % 300 oranında yükleme olduğu aşırı yükleme zamanında bile iyi bir performans gösterdiği açıklanmıştır.

(K. Xiao, Xiao, Zhang, Chen ve Xia, 2015) tarafından yapılan çalışmada toplam-çarpım (sum-product) algoritmasına dayalı çok kullanıcı sezimi yöntemi önerilmiştir. SCMA'nın teorideki performansını ölçmek için AMI (Average Mutual Information) algoritması önerilmiştir. Toplam-çarpım algoritmasından ilham alınarak bazı kullanıcılara yüksek

olasılık değerli öncelikli kararlar alarak yineleme sayısını azaltmaya dayanan bir yöntem önerilmiştir. Burada karmaşıklığın azaltılması için tüm işlemleri logaritmik olarak yapılmıştır. AWGN ve Rayleigh sönümlenmeli kanalda sonuçlar alınmıştır.

Du, Dong, Chen, Fang ve Wang, (2016) tarafından yapılan çalışmada seri MPA algoritması üzerinde karmaşıklığı azaltmak için kalıntı destekli MPA (residual-aided MPA, R-MPA) önerilmiştir. Mesajların sıralı olarak güncellendiği asenkron MPA; genellikle tüm mesajların paralel bir şekilde güncellendiği eşzamanlı varyanttan daha hızlı yakınsar. Bununla birlikte, asenkron MPA şemasının önceden tanımlanmış belirli sırası her zaman en iyi seçenek değildir. R-MPA yöntemi düğümler arasındaki kalıntının en büyük olan mesajları sırasıyla güncellenmektedir. Yapılan çalışma yineleme sayısını azaltmaya yöneliktir ve simülasyon sonuçları 2 iterasyon ile gerçekleştirilen algoritmanın 0,05 dB düşüşle benzer BER performansı verdiği görülmüştür.

Long, Chen, Guo ve Fang, (2016) tarafından yapılan çalışmada HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) algoritması geliştirilmiştir. HARQ daha önce bilinen ve doğru olarak çözülmüş mesajların tekrardan iletilmesine dayanan bir algoritmadır. Eğer mesajların bir kısmı bilinirse geri kalan mesajlar daha güvenilir bir şekilde sezebilir fikrine dayanır. Gecikme ve güvenilirlik arasındaki denge ayarlanarak algoritma gerçekleştirilebilir.

Kexin Xiao, Baicen Xiao, Chen, Xia, Chen ve Ma (2016) tarafından yapılan çalışmada SCMA için geliştirilen çoklu kullanıcı sezim yöntemleri için yakınsama analizinin yapılmasını sağlayan EXIT (extrinsic information transfer) aracı geliştirilmiştir. Belirli kanal koşullarında SCMA tespitinin yinelemeyi durdurma kriterleri analiz edilmiş ve SCMA kod kitabının tasarım kılavuzu da tartışılmıştır.

Du, Dong, Chen, Fang ve Yang, (2016) tarafından yapılan çalışmada seri MPA algoritması üzerinde düğümlerin ikisinin birlikte mesaj güncellemesine dayanan yeni bir algoritma S-MPA (shuffled-MPA) önerilmiştir. Bunun sebebi geleneksel MPA'da iterasyonların birbirinden sonra devam etmesidir. Güncellemelerin birlikte yapılması karmaşıklığı artırmıştır. Bunun önüne geçmek için grup halinde bu işlemler yapılarak karmaşıklık düşürülmüştür.

Du, Dong, Chen, Wang ve Gao, (2017) tarafından yapılan çalışmada MPA algoritması üzerinde karmaşıklığı azaltmaya yönelik yeni bir yöntem geliştirilmiştir. MPA 2 ayrı

algoritmaya sahiptir. Bunlar seri planlama ve paralel planlamadır. Bunlardan seri olan paralele göre daha hızlıdır. Fakat hızlı olmasıyla karmaşıklık artmaktadır. Geliştirilen bu algortmada güncelleme sayısı seçilerek karmaşıklık azaltılabiliyor. Düğümlerde sayıcılar vasıtasıyla maksimum güncelleme sayısı belirleniyor. Sonuçlar aynı BER'e karşılık düşük karmaşıklık olduğunu göstermiştir.

Gao, Duo, Dong ve Zhu, (2018) tarafından yapılan çalışmada sıkıştırılmış algılama (compressed sensing, CS) yardımıyla MPA detektör tasarlanmış. Detektör iki adımlı olarak tasarlanmış. İlk aşamada MPA önsezim yapılmış, daha sonra önsezim tarafından gözlemlenen sembol hatalarına yönelik hataları tahmin etmek için CS tabanlı açgözlü izleme (greedy pursuit) algoritması önerilmiştir. Normalde CS seyrek sinyali geri elde etme yöntemi olduğu için doğrudan SCMA'ya uygulanamaz. Bu yüzden 2 aşamalı bir algoritma yapılmıştır ve böylelikle karmaşıklık azaltılmıştır. Bu çalışmada thresold aided adaptive subspace pursuit algoritması kullanılmıştır.

Ma, Yang, Chen ve Siu, (2017) tarafından yapılan çalışmada MPA üzerinde yineleme sayısını azaltmak için DFG-MPA (Dynamic Factor Graph - MPA) önerilmiştir. Karmaşıklığı azaltmak için işlem sayısı azaltılmıştır. Bunun için de yayında G olarak geçen bir değer hesaplanarak, bu değer en büyük olduğu yineleme seçilerek kaynak düğümünden değişken düğüme tekrardan geçiş önleniyor. Böylelikle yineleme sayısı azaltılıyor. Önerilen algoritmayı orijinal MPA ile karmaşıklık ve BER performansı olarak kıyaslamışlar. G aynı zamanda bir karmaşıklık ve BER arasında bir denge sağlamaktadır.

Yang, Ma ve Siu, (2017) tarafından yapılan çalışmada alıcı tarafında küre çözücü (Sphere Decoding, SD) tabanlı yeni bir MPA yöntemi önerilmiştir. SD sayesinde takımyıldızı noktalarında daraltma yapılarak BER'de göz ardı edilebilecek bir düşüş ile işlem yükü dolayısıyla karmaşıklık azaltılmıştır. Burada kritik hedef kodsözcüğü birleşimlerinin sayısını azaltmaktır. Bu sebeple kürenin yarıçapı ayarlanarak algoritmanın karmaşıklık ve performans arasındaki dengesi düzenlenebilmektedir.

Huang, Li, Zhao, Xu ve Wang, (2018) tarafından yapılan çalışmada 2 tane basitleştirilmiş algoritma önerilmiştir. Bunlar genelleştirilmiş MPA yaklaşımı (GAMP-MPA) ve SIC-GAMP-MPA algoritmalarıdır. GAMP vektör problemlerini skaler probleme dönüştürerek karmaşıklığı azaltmakta ve uygulamasını kolaylaştırmaktadır. GAMP-MPA ve SIC-

GAMP-MPA düşük SNR'da geleneksel MPA'dan daha iyi sonuçlar veriyor. Performansın daha önemli olduğu az kullanıcıli durumlarda GAMP-MPA kullanılırken, karmaşıklığın daha önemli olduğu çok kullanıcıli durumlarda ise SIC-GAMP-MPA kullanılmaktadır.

Han, Hu, Chen ve Lu, (2018) tarafından yapılan bu çalışmada SCMA'nın yüksek sezim karmaşıklığından yola çıkarak stokastik hesaplama (stochastic computing) kullanılarak karmaşıklığı azaltılmaya çalışılmıştır. Stokastik hesaplama karmaşık işlemleri çok basit mantıksal işlemlere dönüştüren bir yöntemdir. Burada geleneksel SCMA'ye ek olarak özellikle MPA'daki karmaşık işlemleri mantıksal işlemlerle yaparak aynı BER değerlerine daha az karmaşıklıkla ulaşılmıştır. Yaklaşık % 69 oranında karmaşıklığın azaltıldığı belirtilmiştir.

Bao, Ma, Xiao, Tsiftsis ve Zhu, (2018) tarafından yapılan bu çalışmada yazarların amacı kod kitabı tasarımını idealleştirmeye çalışmak olduğu için bir kod kitabının farklı düzlemlere yansıtılarak bunları EXIT aracıyla değerlendirip eniyilemeye çalışmışlardır. Çalışmada ek olarak SCMA çalışma prensibine ek olarak FEC (forward error correction) kodlamasından sonra bit aralıklayıcı (bit interleaver) eklenmiştir.

Durak ve Ertug, (2019a, 2019b) tarafından yapılan çalışmalarda CS tabanlı bir çoklu kullanıcı sezici geliştirilmiştir. Gao ve arkadaşları (2018) tarafından geliştirilen yöntemden ilham alınarak SCMA'nın alıcı kısmında olan MPA'ya ek bir seyrek hata doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemleri yaparken CS tabanlı aç gözlü (greedy) algoritmalarından COSAMP kullanılmıştır. Geliştirilen yöntem; orijinal MPA'ya göre aynı yineleme sayısında oldukça iyi performans göstermektedir.

Aktif kullanıcı sezimi ile ilgili yapılan çalışmalar ise genel olarak 2 kategoriye ayrılabilir. Bunlar sıkıştırılmış algılama tabanlı yöntemler ve EM (expectation maximization) tabanlı yöntemlerdir. SCMA'yı geliştiren Bayesteh, Nikopour ve arkadaşları 2014 yılında yayınladıkları çalışmada (Bayesteh, Yi, Nikopour ve Baligh, 2014) 3 adet aktif kullanıcı sezimi (AKS) yöntemi geliştirmişlerdir. Önerilen bu 3 yöntem; kanal tahminine dayalı, CS problemi olarak düşünülen FOCUSS (FOCal Underdetermined System Solver) algoritması ve EM tabanlı yöntemlerdir. Bu yöntemler sadece kavram olarak belirlenmiş daha sonra yapılan çalışmalar bu kavramları geliştirmeye yönelik olmuştur. Ayrıca Nikopour'un yayınında tüm kaynakların kanal kazancının tüm kaynak elemanları (RE) için aynı olarak

kabul edilebildiği bir zayıflama bloğu için aynı zaman-frekans bloğunu kullanmasından dolayı sonraki çalışmalarda pratikte mümkün olmayan bu duruma farklı alternatifler önerilmiştir.

Y. Wang, Zhou, Xiao, Zhang ve Lian, (2015) tarafından yapılan çalışmada EM tabanlı seyrek Bayes öğrenme (sparse bayesian learning, SBL) kullanılmıştır. GF haberleşmesinden dolayı her an haberleşme potansiyeline sahip kullanıcıların oluşturduğu aşırı pilot sinyal yükünün frekans verimliliğini azalttığı belirtilmiştir. Bu sebeple SBL ile AKS ve kanal kestirimi (KK) yapılmıştır.

Struminsky, Kruglik, Vetrov ve Oseledets, (2016) tarafından yapılan çalışmada ise Wang ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan çalışmaya ek olarak çok fazla aktif kullanıcı olduğu durum için SBL tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntemin daha hızlı olduğu ve daha iyi yakınsama oranı elde ettiği belirtilmiştir.

B. Wang, Dai, Yuan ve Wang, (2016) tarafından yapılan çalışmada CS tabanlı bir AKS geliştirilmiştir. Çalışmanın çıkış noktası Nikopour ve arkadaşları (2014) tarafından yapılan çalışmada kullanıcı aktivitesinin bilindiği varsayımının pratikte mümkün olmamasıdır. İstatistiksel olarak toplam kullanıcı sayısının yalnızca % 10'luk bir kısmının bir zaman diliminde aktif olduğu için genel olarak bir seyrek yapıdan söz edilebilir. Bu sebeple sıkıştırılmış algılama teorisinden yararlanarak AKS yapılmıştır. Bu çalışmada COSAMP (Compressive Sampling Matching Pursuit) algoritması kullanılmıştır. Yöntem kaba bir aktif kullanıcı listesine (AKL) sahip olduğu varsayıp seyreklik ön bilgisini kullanarak AKS gerçekleştirmektedir. Daha sonra yanlış sezimler listeden çıkarılarak doğru listenin yinelemeli olarak elde edilmesi hedeflenmiştir. Fakat böyle bir kaba bir AKL'yi pratikte bilmek mümkün değildir. Dolayısıyla algoritmanın gerçek hayatta kullanılması zordur.

Deng, Wang ve Wang, (2016) tarafından yapılan çalışmada pilot sinyalin önemine değinilmiş ve pilot sinyalin AKS'ye etkisi incelenmiştir. Optimal bir pilot sinyal dizaynı yapılmıştır. Bu sinyal rasgele referans sinyali ile kıyaslanarak üstünlüğü gösterilmiştir.

Sergienko ve Klimentyev, (2017) tarafından yapılan çalışmada 2 adet KK algoritması önerilmiştir. Birincisi yalnızca pilot sinyallere dayalıyken diğeri sezim kalitesini arttırmak için SCMA çözme işleminden sonra HD (hard decisions) kullanarak gerçekleştirilmiştir. Dik ve dik olmayan pilot sinyalleri kullanılmış. Pilot sinyali sayısının artması kanal durum

bilgisini (channel state information, CSI) geliştirmesine karşın spektral verimliliği azaltmaktadır. Bu sebeple pilotların sayısı optimize edilmelidir. Bu yayında diğer yayınlardan farklı olarak bütün kullanıcıların aktif olduğu durum göz önüne alınmıştır. Dik ve dik olmayan pilot sinyaller kullanılarak bunların etkisi incelenmiştir.

Liu, Wu, Li ve Tirkkonen, (2017) tarafından yapılan çalışmada kullanıcı seyrekliği ön bilgisine sahip olmayan bir yukarı bağlantı yönlü SCMA alıcısı tasarlanmıştır. Bu yöntemin çıkış noktası daha önce bahsedilen kaba AKL'nin gerçekte mümkün olmamasından kaynaklanmaktadır. Sezim tabanlı grup dikgen eşlik izleme (Detection based group orthogonal matching pursuit) kullanılarak AKS gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kanal kazancı ve gürültü gücünü hesaba katarak Bağlı-MPA (joint-MPA, JMPA) kullanılmıştır. Düzenlenen JMPA gürültüden, kanal zayıflamasından ve dikgen olmamadan kaynaklanan pilot dizisinden dolayı yanlış sezim yapılmış olanları elemeye yardımcı olur.

Y. Wang, Zhang, Zhou, Lian ve Xiao, (2017) tarafından yapılan çalışmada dağıtıcı kanallarda AKS ve KK yapılmıştır. Dağıtıcı kanallar bir iletim boyunca çoklu snlemeye maruz kalan kanallardır. Bu yayında bu kanallarda pilot yükünü azaltmak için AKS ve KK önerilmiştir. Ayrıca KK'yi geliştirmek için yeni bir haritalama örüntüsü önerilmiştir. AKS yöntemi olarak SBL kullanılmıştır.

Joonki Kim, Lee, Jintae Kim, Wang, Na ve Hong, (2017) tarafından yapılan çalışmada aynı zaman/frekans kaynaklarını kullanan aktif ve inaktif kullanıcıların birlikte olduğu SCMA sistemleri için yeni bir UL izinsiz iletişim alıcısı tasarlanmıştır. Bu problemden yola çıkarak kodszckleri ve aktif / inaktif kullanıcıları ayıran yeni bir SCMA alıcısı tasarlanmıştır. Nikopour'un yayınındaki pilot sinyalleri olmadan sadece ön-programlı kaynak blokları (header) ile aktif ve inaktif kullanıcıların birlikte olduğu durumlar için SCMA alıcısı tasarlanmıştır. Aktif ve inaktif kullanıcılar için kodszckleri önerilmiştir. Ve inaktif kullanıcıların olasılığını MPA decoder'ın dan çıkarılmıştır. Son olarak önerilen algoritma ve geleneksel SCMA sistemlerinin yanlış alarm olasılığı, kaçırılan sezim olasılığı ve BER'e göre kıyaslanmıştır.

Wei ve Chen, (2018) tarafından yapılan çalışmada SCMA'nın alıcı kısmında bulunan MPA'nın çarpan grafiğine (factor graph) dayalı inanç yayılımı (belief propagation, BP)

çerçevesi formüle edilmiş. BP'nin doğrudan uygulanamamasından dolayı Gaussian ailesi ile birtakım işlemler yapılarak gerçekleştirilmiştir.

J. Dai, Chen, Niu ve Lin, (2018) tarafından yapılan çalışmada çok giriş çok çıkış MIMO-SCMA sistemlerde Gauss yaklaşımı prensibine dayalı olarak kısmi aktif message passing alıcısı önerilmiştir. Kayan bir pencere vasıtasıyla hangi kullanıcıların aktif olduğuna karar veren ve decode eden bir yöntem önerilmiştir. Böylelikle karmaşıklığın azaltıldığı belirtilmiştir

F. Wang, Zhang, Zhao, Huang ve Li, (2018) tarafından yapılan çalışmada kanal kazancını analiz etmeye dayalı olan yeni bir düzenlenmiş AKS (refined-AUD, RAUD) tasarlanmıştır. Mevcut çalışmalarda MPA'dan önce AKS yapılması gerektiği için CS kullanılmıştır. Fakat bu çalışmalar frekans seçici kanalda uygun olmadığı için kazancı analiz etmeye dayalı olan yeni bir düzenlenmiş AKS tasarlanmıştır. Kanal kazancını tam olarak kullanarak ve kullanıcıların 2 durumunun (aktif ve pasif) karakteristik değerleri arasındaki farkı analiz ederek, RAUD modülü kullanıcıların sezim doğruluğunu artırır. Aynı zamanda önerilen modülün karmaşıklığı ihmal edilebilir. Özetle önce AKS yaparak buradan elde ettiği aktiflik bilgisini KK'de kullanılarak, daha sonra RAUD algoritması ile kanal kazancını kullanarak tekrardan AKS yapılıp bu bilgiler MPA'ya aktarılmaktadır.

(H. Huang, Zhao, Wang ve Li, 2019) tarafından yapılan çalışmada farklı servislerin kullanabileceği çoklu kod sözcüğü SCMA (multi codebook SCMA, MC-SCMA) önerilmiştir. MC-SCMA'da kod sözcüğü gruplama yapılarak pilot yükünü azaltarak AKS performansını artırmayı hedeflemişlerdir. Kod sözcüğü gruplama; tüm kod sözcüklerinin yerine düzenlenmiş gruptaki kod kitabı seçiliyor. Böylece AKS performansı artırılmıştır.

Guo, Wu, Wu, Chen ve Zhang, (2019) tarafından yapılan çalışmada ölçüm matrisinin optimizasyonu için pilot şeması önerilmiş ve DSM-GOMP (dynamic sensing matrix based Group Orthogonal Matching Pursuit) algoritması önerilmiştir. SNR'ın durumuna, zadoff-chu (ZC) dizisine veya gram matrise göre algılama matrisi optimize edilmiştir.

(Wei, Chen, Wu, Ma ve Tsiftsis, 2019) tarafından yapılan çalışmada aktif kullanıcı tespiti için, her bir kullanıcının CIR'leri (channel impulse response), student t-dağılımına göre

modellenmiştir ve VB (variational Bayesian) çıkarımı ile sinyalleri seyrek olarak çıkarılmıştır.

Durak ve Ertug, (2021) tarafından yapılan çalışmada literatürde bulunan ve pratikte gerçekleştirilmesi mümkün olmayan çalışmaların çoğunun aksine seyreklik ön bilgisine ihtiyaç duymayan AKS ve KK geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada aktif kullanıcı sayısını en doğru şekilde tespit etmek için sahne odaklı (stage-wise) bir yaklaşım ile her bir zaman dilimi için AKS işlemi gerçekleştirilmiştir. Fakat zaman dilimleri arasında zamansal korelasyondan dolayı aynı kullanıcıların aktif olma durumunu göze alınarak işlem yükünün azaltılması hedeflenmiştir. JMPA ile yanlış sezim yapılan kullanıcılar elenerek sadece aktif kullanıcıların kanal durum bilgileri elde edilip verileri MPA ile çözülmüştür.

#### Araştırmanın amacı

Tez kapsamında yapılan araştırmaları 2 kısma ayırabiliriz. Bunlardan ilki yeni bir çoklu kullanıcı sezimi geliştirme çalışmalarıdır. Yeni nesil haberleşme sistemlerinde kullanılmaya aday çoklu erişim yöntemlerinden olan SCMA'da çoklu kullanıcı sezimi ile ilgili literatürde bulunan çalışmalara bakıldığında özet olarak MPA'daki işlem yoğunluğunu azaltmaya yönelik çalışmalar bulunmaktadır. SCMA'nın kullanıcı sayısı arttıkça alıcı kısmı olan MPA'da karmaşıklığın çok fazla arttığı için bu problemde yola çıkarak yapılan çalışmalar incelenmiştir. Tez kapsamında özellikle sıkıştırılmış algılama tabanlı yapılan çok az sayıda çalışma olduğu için sıkıştırılmış algılama penceresinden bu probleme bakılarak seyrek sinyali geri oluşturma işlemi gerçekleştirilmek istenmiştir. Geliştirilen yöntem, MPA'nın yineleme sayısını azaltarak benzer başarı performansına sahip olmayı başarmıştır.

Tez kapsamında yapılan ikinci çalışma ise yeni bir aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi yöntemi geliştirme çalışmasıdır. Aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi ile ilgili literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında çalışmaların EM tabanlı ve CS tabanlı olmak üzere 2'ye ayrılacağı söylenebilir. Yapılan çalışmalarda genel olarak seyreklik ön bilgisine ihtiyaç duyan algoritmaların olduğu görülmüş ve gerçekte uygulamanın mümkün olmadığı bu problem içinde yine sıkıştırılmış algılama yardımıyla bir yöntem geliştirilmek istenmiştir. Aynı zamanda yapılan çalışmalarda geliştirilen algoritmaların tek bir zaman diliminde AKS işlemini gerçekleştirdiği ve bu durumun farklı zaman dilimlerinde kullanıcı

aktivitesinin göz ardı edildiğini göstermektedir. Özellikle makine tipi haberleşmesinde zaman dilimleri arasında kullanıcı aktivitesinin zamansal korelasyonu olması ve sistemin durumuna göre (az kullanıcı-çok kullanıcı) aktif kullanıcı sayısının uyarlamalı olarak elde edilmesi gerekliliği çalışmamızın çıkış noktasını oluşturmaktadır. Bu sebeple bu eksiklikler dikkate alındığında seyreklik ön bilgisine ihtiyaç duymayan ve farklı zaman dilimlerindeki zamansal korelasyonu dikkate alarak AKS ve KK gerçekleştiren bir yöntem geliştirilmiştir. Aktif kullanıcı sayısına uyarlamalı olarak ulaşarak bu aktif kullanıcılar için verilerin çözülmesi sistemin işlem yükünü oldukça düşürmektedir ve yukarı bağlantı yönlü izinsiz SCMA sistemleri için gerekli olan bir işlemdir. Geliştirilen yöntemde aynı zamanda JMPA ile geri besleme sağlanarak yanlış sezilen kullanıcıların elenmesi sağlanmıştır. Yöntemin yanlış olarak aktif kullanıcı olarak sezdiği fakat aslında pasif olan kullanıcıların elenmesi yönteme 2 katmanlı bir yaklaşım sunmaktadır. Daha sonra aktif kullanıcıları doğru olarak sezerek bu kullanıcıların kanal durum bilgilerini elde ettikten sonra verilerini çözmesi sağlanmıştır. Tez kapsamında yapılan katkılar şu şekilde özetlenebilir:

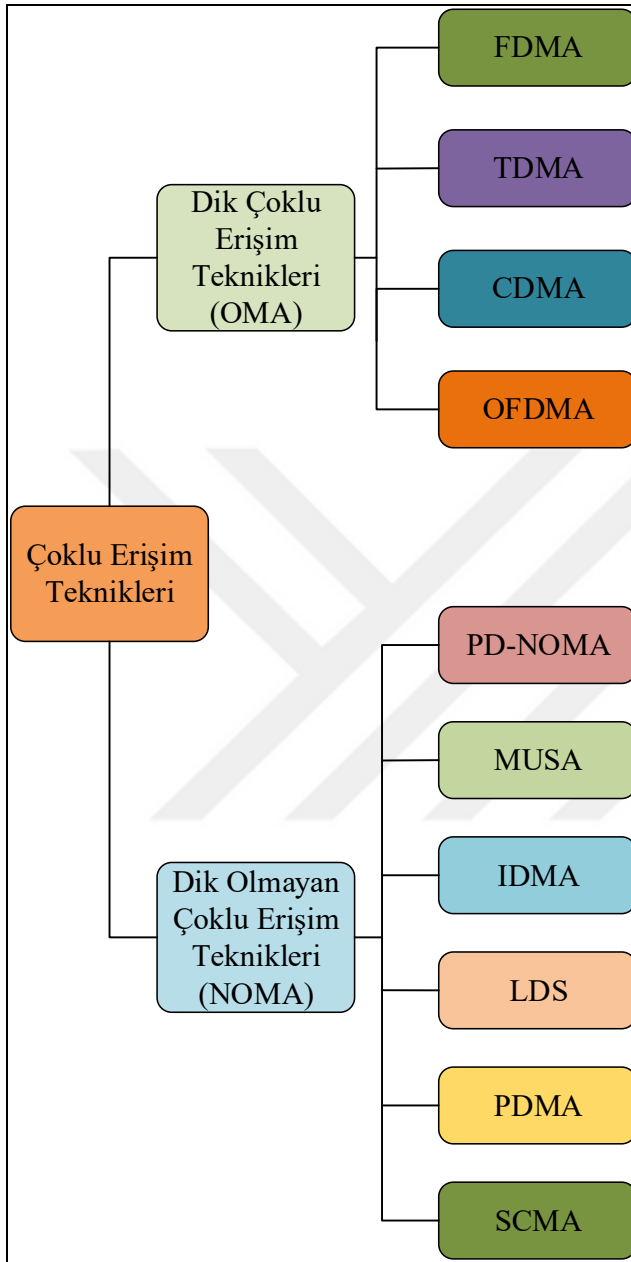
- İlk olarak sıkıştırılmış algılama tabanlı bir çoklu kullanıcı sezici tasarlanmıştır. Açgözlü algoritmalarından olan COSAMP algoritmasını kullanarak MPA'da birincil sezim sonucunda oluşan hataları doğrularak MPA'nın yineleme sayısının azaltılması hedeflenmiştir. MPA'nın yineleme sayısı düşürülerek benzer ve daha iyi başarımlar elde edilmiştir.
- İkinci olarak kitlesel makine tipi iletişimde yeni nesil haberleşme teknolojilerinde izinsiz haberleşmesinde olması gereken aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem dinamik ve seyrekliğe uyarlamalı bir yöntemdir. Makine tipi haberleşmesinde farklı zaman dilimlerinde aktivite oranının çok fazla değişmemesinden yani zamansal korelasyondan dolayı geliştirilen yöntem bir önceki zaman dilimindeki aktif kullanıcı sayısını dikkate alarak yineleme sayısını azaltarak ve daha doğru bir şekilde uyarlamalı olarak aktif kullanıcıları sezer ve aktif kullanıcıların kanal durum bilgisini en küçük kareler yöntemi ile kestirir. JMPA ile yanlış sezim yapılan kullanıcılar elenerek güncellenen aktif kullanıcı listesi MPA ile verileri çözümlenir. Geliştirilen yöntem literatürde bulunan başlıca yöntemlerle kıyaslandığında kaçırılan sezim olasılığı (miss detection probability) bakımından oldukça başarılıdır.

Tezin giriş bölümü sonrasında geri kalan kısımları şu şekilde planlanmıştır. Tezin 2. bölümünde çoklu erişim teknikleri detaylı olarak açıklanacak ve 3. bölümde tez kapsamında çalıştığımız SCMA hakkında detaylı olarak verici, alıcı yapılarından bahsedilecektir. Daha sonra 4. bölümde sıkıştırılmış algılama teorisinden genel hatlarıyla bahsedilecek, açgözlü algoritmalar açıklanarak bu tezinin haberleşme sistemleri açısından nasıl kullanıldığından bahsedilecektir. Tezin 5 ve 6. bölümlerinde geliştirilen yöntemler açıklanacaktır. Geliştirilen çoklu kullanıcı sezici tezin 5. bölümde, aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi yöntemi ise 6. bölümde açıklanacaktır ve benzetim çalışmaları verilecektir. Tezin son bölümü olan 7. bölümde geliştirilen yöntemlerin benzetim sonuçlarına göre yöntemler değerlendirilerek gelecek çalışmalar hakkında önerilerden bahsedilecektir.





## 2. ÇOKLU ERİŞİM TEKNİKLERİ



Şekil 2.1. Çoklu erişim teknikleri genel yapısı

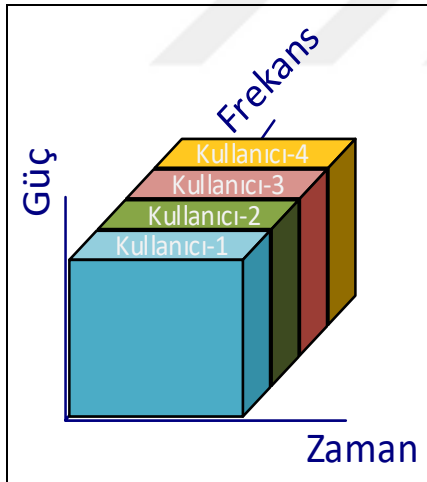
Çoklu erişim teknikleri; çoklu kullanıcılara bir haberleşme kanalını verimli olarak kullanmasını sağlar. Kullanıcılar, sinyallerini kendi kanalları üzerinden bağımsız olarak bir alıcıya iletirler. İletimler belirli bir güç kısıtlaması altında toplam bant genişliği sınırları içinde olmalıdır. Kullanıcıların yapmış olduğu iletişim esnasındaki iletimler baz istasyonları tarafından koordine edilerek senkronize bir şekilde alıcılara ulaştırılır. Çoklu erişim teknikleri Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi dik çoklu erişim teknikleri (Orthogonal

Multiple Access, OMA) ve dik olmayan çoklu erişim teknikleri (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) olmak üzere 2'ye ayrılır.

## 2.1. Dik Çoklu Erişim Teknikleri (OMA)

Dik çoklu erişim tekniklerinde (OMA), birden fazla kullanıcı dik kanallar üzerinden iletim yapar. Kullanıcıların sinyal dalga formunda hiçbir parazit olmaz. Böylelikle alıcı, tek bir kullanıcınıninkine benzer hata performansları ile diğer kullanıcıların müdahalesi olmadan her kullanıcı için sinyali algılar. OMA tekniklerinin örnekleri arasında FDMA, TDMA, CDMA ve OFDMA teknikleri yer alır. Birinci nesil (1G) FDMA, ikinci nesil (2G) TDMA, üçüncü nesil (3G) CDMA ve dördüncü nesil (4G) OFDMA kullanılır. Tüm bu çoklu erişim tekniklerinde, farklı kullanıcılar zaman, frekans veya kod alanında farklı dik kaynakları kullanır, bu nedenle alıcıda daha kolay ayrılırlar.

### 2.1.1. Frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA)

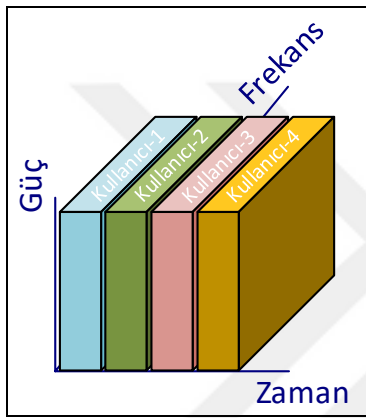


Şekil 2.2. FDMA gösterimi

Birinci nesil (1G) haberleşme sistemlerinde kullanılan FDMA en klasik çoklu erişim tekniğidir. Mevcut bant genişliği tüm kullanıcılara aynı anda hizmet etmek için eşit bant frekans kanallara bölünmüştür ve Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi her kullanıcıya özel kanal tahsis edilmiştir. FDMA'da, frekans birkaç küçük alt kanala bölünmüştür. Bu yöntem analog ve dijital radyolarda kullanılır. FDMA'nın temel olarak bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu zorluklardan biri, baz istasyonundaki (base station, BS) modülatörlerin ve demodülatörlerin aynı anda tüm kullanıcılara hizmet vermesi gerekliliğidir. Bu durum,

BS'nin çok sayıda kullanıcıyı (yüzler ila binlerce) idare etmesi gereken aşırı maliyet ve karmaşıklığa yol açar. İkinci olarak, FDMA, dar bant kanallarının sabit tahsisi nedeniyle değişen iletim hızı gereksinimleri olan kullanıcıları idare etmede esnek değildir. Üçüncüsü, atanan kullanıcı tarafından kullanılmıyorsa hiçbir alt kanalın diğer kullanıcılara yeniden tahsis edilmediği durumlarda bant genişliği israfına neden olur. Bu çoklu erişim tekniği analog ve sayısal radyolarda kullanılır (Bukar, 2016).

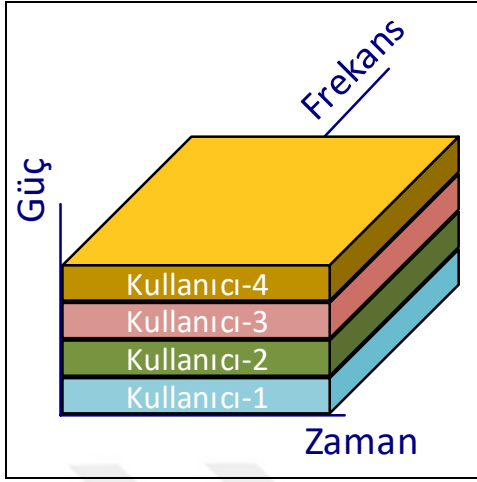
### 2.1.2. Zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA)



Şekil 2.3. TDMA gösterimi

Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA), her kullanıcının zamanın bir kısmı için tüm bant genişliğini kullanarak iletim yapmasına izin verir. Şekil 2.3.'te görüldüğü gibi radyo frekans (RF) kanalı frekans yerine zamana göre eşit olarak bölünür. Yani her frekans kanalı, periyodik olarak tekrar eden bir dizi zaman dilimine bölünmüştür ve çok sayıda kullanıcıya, hız gereksinimlerine göre değişebilen bir dizi zaman aralığı tahsis edilmiştir. Zaman dilimi sayısı, her kullanıcıya kaç zaman dilimi atandığı ve bu atamanın nasıl yapıldığı, izin verilen gecikme, kullanılabilir bant genişliği, modülasyon tekniği vb. gibi bir dizi faktöre bağlıdır. Bu çoklu erişim tekniği 2G'de ses ve veri iletişimde kullanılmıştır.

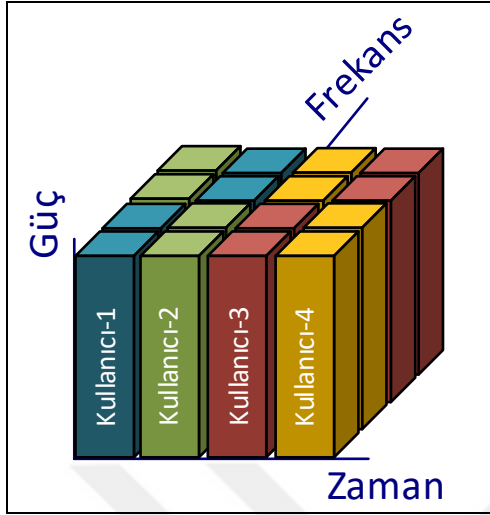
### 2.1.3. Kod bölmeli çoklu erişim (CDMA)



Şekil 2.4. CDMA gösterimi

Üçüncü nesil haberleşme teknolojilerinde kullanılan CDMA’da, Şekil 2.4.’te görüldüğü gibi birden çok kullanıcı aynı zaman-frekans bloğunu kullanarak iletişim gerçekleştirebilmektedir. FDMA’nın aksine, iletilen sinyal aynı frekans aralığını kullanmakta ve TDMA’nın aksine, sinyaller aynı anda iletilir. Her kullanıcının sinyallerinin ayırt edilebilir olması için verici kısmında yayılı spektrum (spread spectrum, SS) kullanılır. SS’de kullanıcıların iletmek istedikleri bilgi sinyali yayma dizisi ile çarpılır. Bunun sebebi kullanıcıların aynı kanaldan ortak olarak iletişim yapmalarından kaynaklı olarak birden fazla kaynak kullanma ihtiyaçlarıdır. Bu kaynaklara yonga dizisi denmektedir. Her kullanıcıya farklı yayma dizisi tahsis etmek mümkündür. Örnek olarak her bir kullanıcıya dik yayma dizileri atayarak alınan sinyal ile bilinen diziler arasındaki korelasyonu kullanarak alıcıdaki mesajları ayırt etmek mümkün olmaktadır (Silva, 2019).

#### 2.1.4. Dik frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA)



Şekil 2.5. OFDMA gösterimi

Dördüncü nesil haberleşme teknolojilerinde kullanılan OFDMA yöntemi, birden fazla kullanıcının mevcut bant genişliğini birçok kanala bölmeye izin veren ve bu kanallara farklı kullanıcılar atayan bir yöntemdir. Bu yöntemin FDMA yöntemine göre en önemli avantajı, kanalların birbirine daha sık yerleştirilmesi ve spektrumun daha verimli kullanılmasıdır (Kiracı, 2020). OFDM'de, Şekil 2.5.'te görüldüğü gibi iletilecek sinyaller birkaç paralel dikgen alt taşıyıcıya eşlenir. OFDMA, FDMA ve OFDM'nin karma bir birleşimidir. WİMAX (IEEE 802.16) ve LTE downlink sistemlerinde kullanılmaktadır. Her kullanıcıya tahsis edilen alt taşıyıcıların sayısı sabit olabilir veya değişebilir ve bu alt taşıyıcı sayısı servis gereksinimlerine bağlıdır.

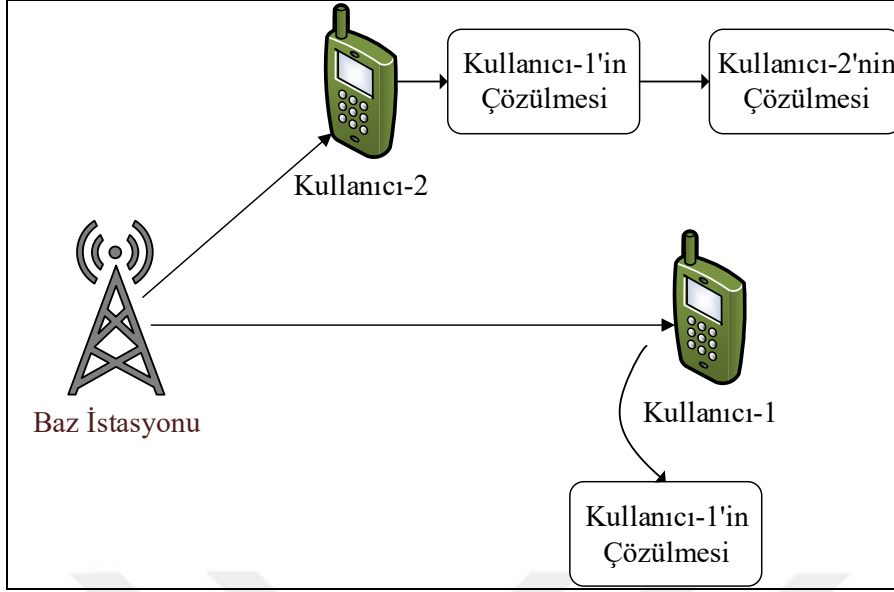
## 2.2. Dik Olmayan Çoklu Erişim Teknikleri (NOMA)

Nesnelerin interneti, kitlesel makine tipi haberleşme gibi yeni nesil teknolojilerin ortaya çıkmasıyla birlikte dik çoklu erişim tekniklerinin yeni gereksinimleri karşılayamayacağından dik olmayan çoklu erişim (NOMA) teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler sistem verimini ve kapasitesini artırmayı hedeflemektedir. Aşırı yükleme probleminde kaynakları ortak olarak kullanma düşüncesi ile yaklaşarak çözüm bulunmaya çalışılmıştır.

NOMA teknikleri iki ana kategoriye ayrılabilir. Bunlardan ilki sembolleri çoklamak için güç eksenini kullandığı için güç eksenli NOMA olarak adlandırılan PD-NOMA'dır. Kullanıcılar arası çakışmaları önlemek ve sembolleri daha doğru olarak çözümlemek için SIC tabanlı olarak çoklu kullanıcı sezimi yapmaktadır. İkinci ana kategori ise kod eksenli yöntemlerdir. Tüm bu teknikler dik olmayan kaynaklarla yeni teknoloji kablosuz sistemlerde istenen kapasiteye ulaşabilmektedir.

### 2.2.1. Güç eksenli NOMA (PD-NOMA)

PD-NOMA'da kullanıcıların kanal koşullarına göre sistem performansında maksimum kazanç elde etmek için her bir kullanıcıya farklı güç seviyeleri tahsis edilir. Sistem başlangıçta kullanıcıların kanal koşullarını karşılaştırır ve kanal koşulları kötü olan kullanıcıya daha yüksek güç, kanal koşulları iyi olana ise daha düşük güç tahsisi yapar. Bu kullanıcılar süperpozisyon kodlama (superposition coding, SC) ile üstüste bindirilerek iletim gerçekleştirilir. Alınan sinyalin çözülmesi için ise Şekil 2.6.'da görüldüğü gibi yüksek güç tahsis edilen kullanıcı düşük güç tahsis edilen kullanıcıların verilerini gürültü olarak algılayarak kendi mesajını çözer. Düşük güç tahsis edilen kullanıcılar ise önce yüksek güç tahsis edilen kullanıcıların verilerini çözerek ardışık girişim iptali (SIC) ile kendi verilerini çözerler. Aşağıdaki şekilde PD-NOMA'nın gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.6. İki kullanıcılu aşağı yönlü bağlantılı PD-NOMA sistemi

Süperpozisyon kodlama birden fazla kullanıcının sinyallerini üst üste bindirme tekniğidir. PD-NOMA'da her bir kullanıcının sinyalini o kullanıcının kanal koşullarına göre belirlenen güç katsayısı ile çarpılarak toplanarak bu işlem yapılır.

$$x = \sqrt{\alpha_1 P} s_1 + \sqrt{\alpha_2 P} s_2 \quad (2.1)$$

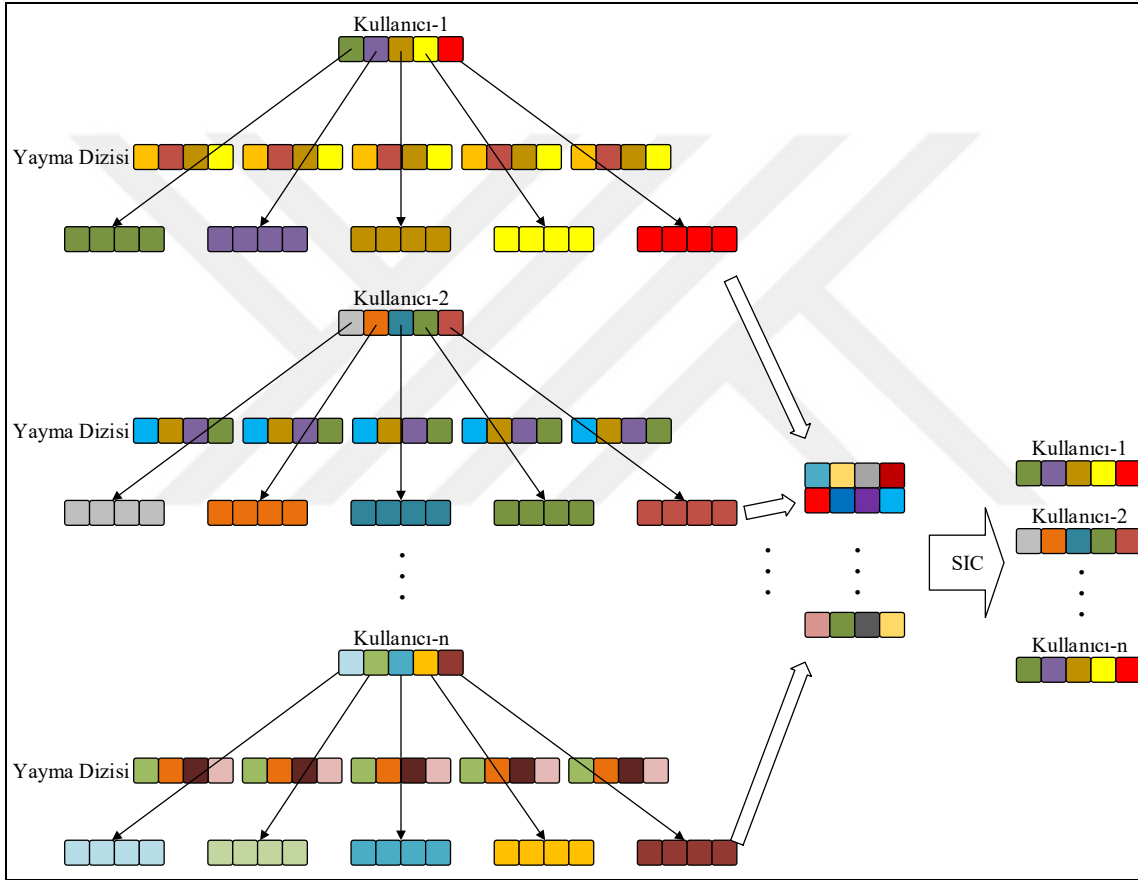
Eş. 2.1'de iki kullanıcıya ait SC ile oluşturulan  $x$  sinyali görülmektedir. Burada toplam güç  $P$  iken  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$ ; kullanıcılara tahsis edilen güç katsayısını ifade eder. Kullanıcılara ait sinyaller ise  $s_1$  ve  $s_2$  olarak ifade edilir. Gönderilen sinyalde kullanıcı 1'in kanal koşulları kullanıcı 2'ye göre daha iyi olduğunu varsayalım. Bu nedenle  $\alpha_1 < \alpha_2$  olarak güç tahsisi yapılır. Toplam güç sabit olacağı için  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$  olur.

$$y_k = h_k x + n_k \quad (2.2)$$

Eş. 2.2 ile  $k$ . alıcıda alınan sinyal gösterilmiştir. Burada  $h_k$  ve  $n_k$  sırasıyla  $k$ . kullanıcının kanal bilgisi ve gürültüsüdür. Alıcıya gelen bu sinyal SIC tekniği ile ayrı ayrı sinyallere çözülür. Kullanıcı 2'ye gelen sinyalde kullanıcı 1'in verisi gürültü olarak algılanır ve kullanıcı 2 gelen sinyali doğrudan çözer. Kullanıcı 1 ise gelen sinyalde daha yüksek güce sahip kullanıcı 2'nin sinyalini SIC ile eleyerek kendi sinyalini çözer. PD-NOMA'da en kötü kanaldaki hariç her kullanıcı SIC tekniğini kullanmak zorundadır.

### 2.2.2. Çok kullanıcılı paylaşımlı erişim (MUSA)

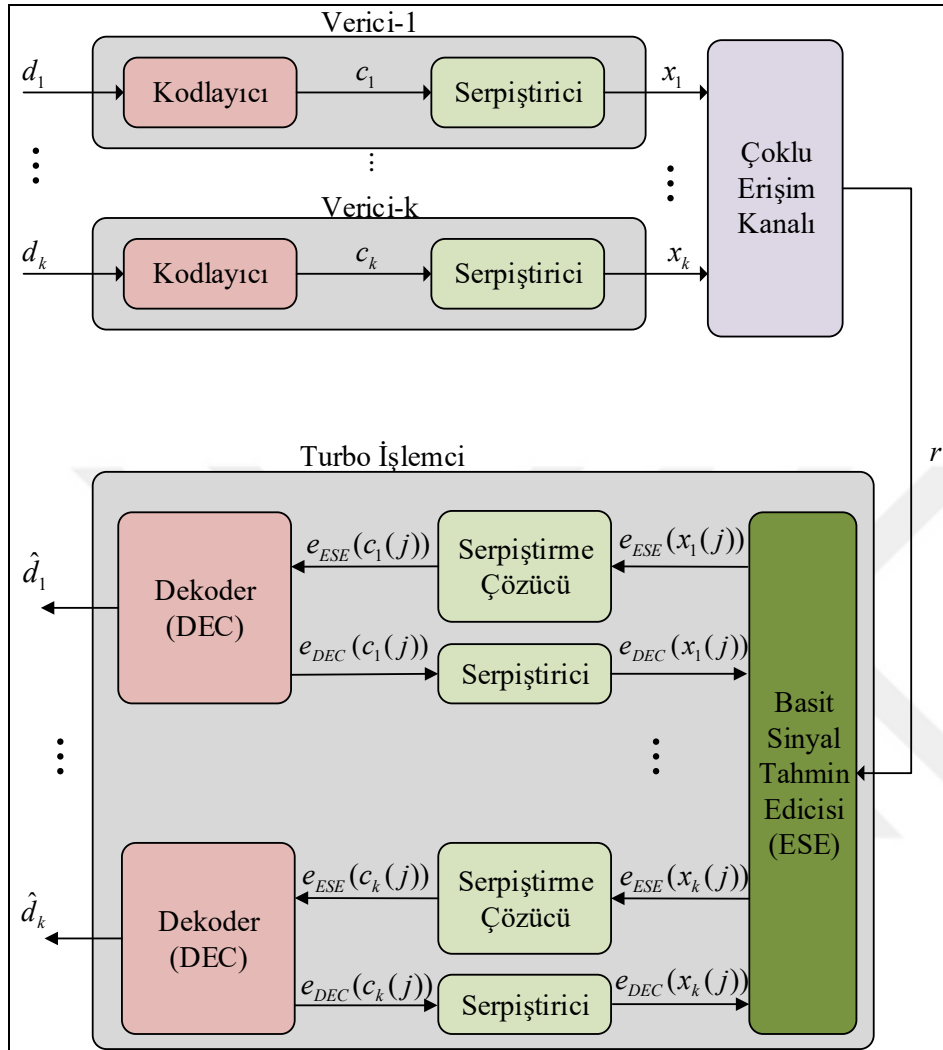
Kod eksenli NOMA kapsamında olan MUSA; her bir kullanıcının sembollerini yazma dizileri ile yaymaya dayanan bir tekniktir. Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi yukarı yönlü bağlantıda bu diziler yayma dizileri setinden rastgele seçilir. Daha sonra her bir kullanıcının yayılmış dizileri bir süper pozisyon işlemi olan paylaşımlı erişim ile üst üste bindirilir. Baz istasyonunda verileri farklı kullanıcılardan ayırmak için SIC tekniği kullanılır.



Şekil 2.7. Çok kullanıcı tarafından paylaşılan dört kaynaklı yukarı yönlü bağlantılı MUSA

Aşağı yönlü bağlantı MUSA'da ise kullanıcılar gruplara ayrılır. Her grupta, farklı kullanıcıların sembolleri, üst üste binen sinyallerin birleşik takımıyla Gri haritalamasını sağlayacak bir şekilde farklı takımıyla eşlenir. Birleşik takımıyla Gri haritalaması, alıcı karmaşıklığını azaltır. Ayrıca yayma dizilerini dikgen olarak seçmek zaman veya frekans çeşitliliği kazancı elde edilmesini sağlar (L. Dai ve diğerleri, 2015).

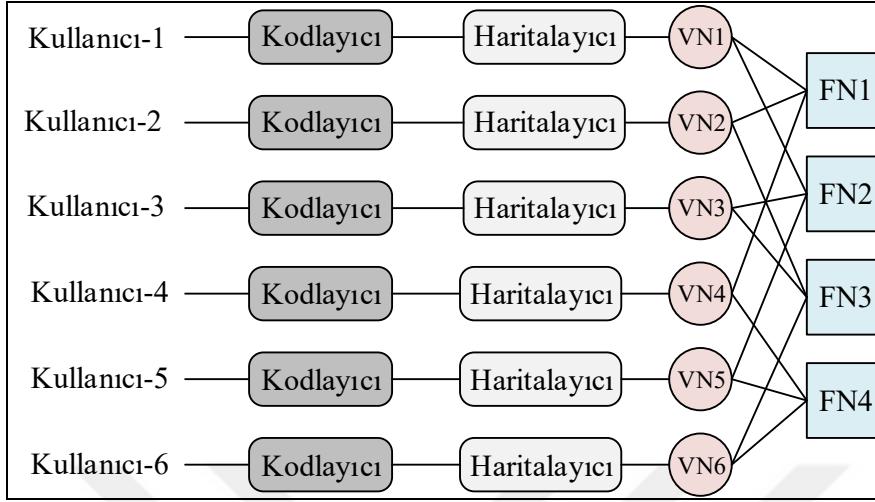
### 2.2.3. Serpiştirme bölmeli çoklu erişim (IDMA)



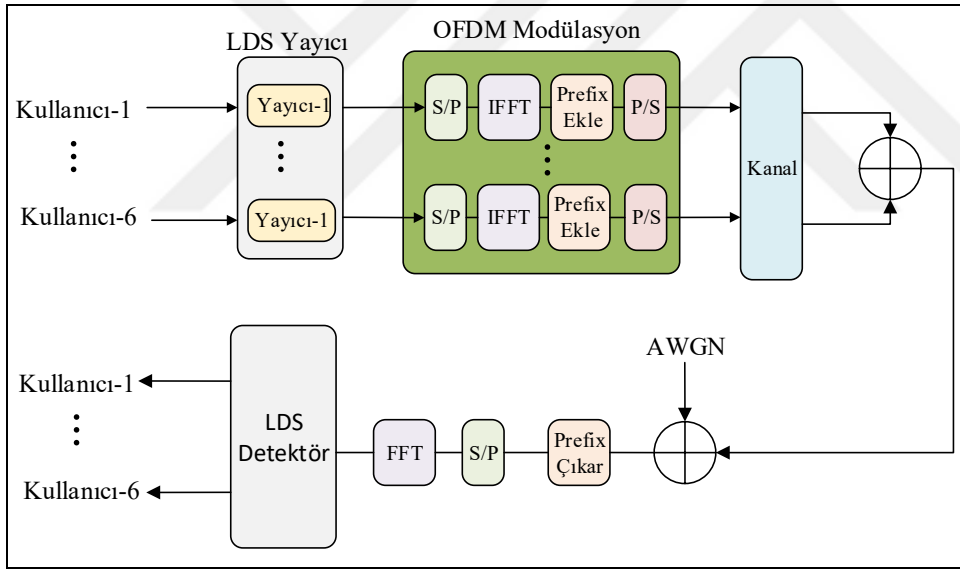
Şekil 2.8. IDMA verici ve alıcı yapısı ( $K$  kullanıcı)

Kod ekseninde olan bir diğer yöntem olan IDMA'da Şekil 2.8.'de görüldüğü gibi semboller yayma dizileri ile çarpıldıktan sonra yonga dizileri halinde serpiştirilir. Kodlama bölümünde yayma faktörü belirlenir. Serpiştirme bölümünde çeşitli üst üste binme örüntülerini oluşturur ve ardından bozucu etki azaltılır. Bir IDMA sisteminde, kullanıcıya özgü bir bit düzeyi serpiştiricisi sayesinde, kullanıcılar arası girişim, üst üste binen sinyalden dolayı bastırılır. Diğer NOMA teknikleri kısa kod sözcükleri veya dizileri kullanırken IDMA'daki serpiştiriciler verilerin uzun bir sinyal akışı boyunca dağılmasını sağlar. Alıcı kısımda ise basit sinyal kestiricisinden (elementary signal estimator, ESE) yararlanılarak karmaşıklığı düşük yongalar halinde bir sezim gerçekleştirilir (H. Kim ve diğerleri, 2017).

### 2.2.4. Düşük yoğunluklu yayılım (LDS)



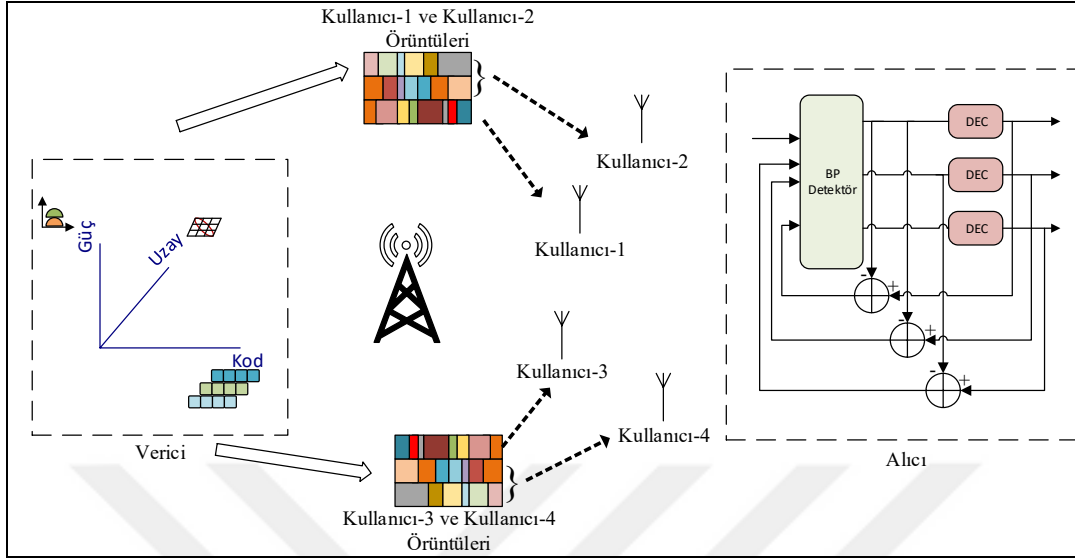
Şekil 2.9. LDS-CDMA şeması (6 kullanıcı ve 4 alt taşıyıcı)



Şekil 2.10. LDS-OFDM şeması

Şekil 2.9.'da görüldüğü gibi kod eksenli olan LDS-CDMA'da, CDMA'daki girişimleri azaltmak için seyrek yayılma dizileri kullanarak sistem performansı artırılmıştır. Bu şekilde kullanıcılar arası girişim azaltılarak aşırı yüklemeye ile daha fazla kullanıcının aynı anda iletişim yapılması sağlanmıştır. Daha sonra Şekil 2.10.'da görüldüğü gibi çok yollu sönümlenme ile mücadele için yongalar yerine OFDM alt taşıyıcıları kullanarak LDS-OFDM yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle spektral verimlilik artırılmıştır. Alıcı kısımda çoklu kullanıcı sezimi için SIC veya MPA kullanılır.

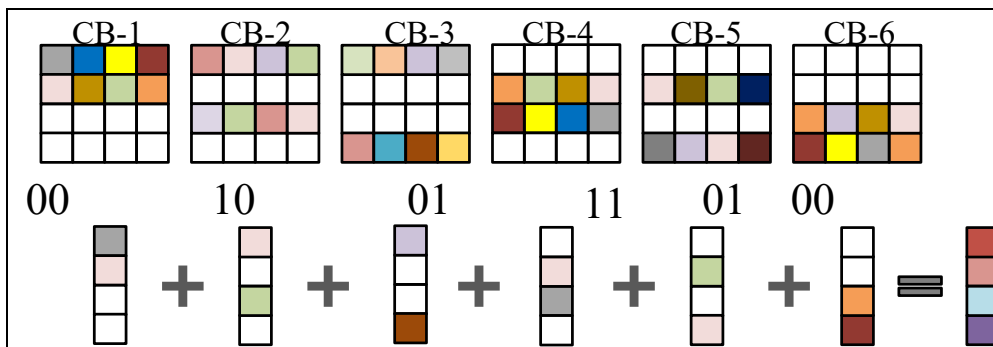
### 2.2.5. Örüntü bölme çoklu erişim (PDMA)



Şekil 2.11. Yukarı yönlü bağlantılı PDMA verici ve alıcı şeması

Kod eksenli çoklu erişim tekniklerinden olan bir diğer teknik olan PDMA’da kullanıcıların iletilen sinyalleri arasındaki çakışmaları azaltmak için ve kullanıcılar arasındaki çeşitliliği artırmak için tasarlanmış dik olmayan kullanıcıya özgü örüntüler kullanılır. Şekil 2.11.’de görüldüğü gibi PDMA’da çoğullama kod, güç, uzak alanında veya bunların birleşimlerinde de gerçekleştirilebilir. Alıcıda çoğullamanın çeşidine göre SIC veya MPA kullanılabilir.

### 2.2.6. Seyrek kod çoklu erişim (SCMA)



Şekil 2.12. SCMA kodlama gösterimi

Kod eksenli NOMA tekniklerinden olan ve tez kapsamında üzerinde çalışılan teknik olan SCMA yeni nesil haberleşme teknolojilerinde makine tipi haberleşmesinde yukarı yönlü bağlantılarda kullanılması muhtemelen bir tekniktir. SCMA LDS’nin geliştirilmiş bir

versiyonudur. Fakat SCMA'da bit akışı Şekil 2.12.'den de görüleceği gibi doğrudan her bir kullanıcıya ayrılmış seyrek kod sözcüklerinden haritalanır. Kod kitapları (codebook, CB) hazırlanırken kullanıcılar arasındaki çakışmayı en aza indirecek şekilde tasarlanır. Çok boyutlu takımyıldızlarından çeşitli şekillerde yansıtılarak tasarlanan bu kod kitapları sayesinde şekil verme kazancı elde edilir. Bu tekniğin detayları Bölüm 3'de ayrıntılı olarak açıklanacaktır.



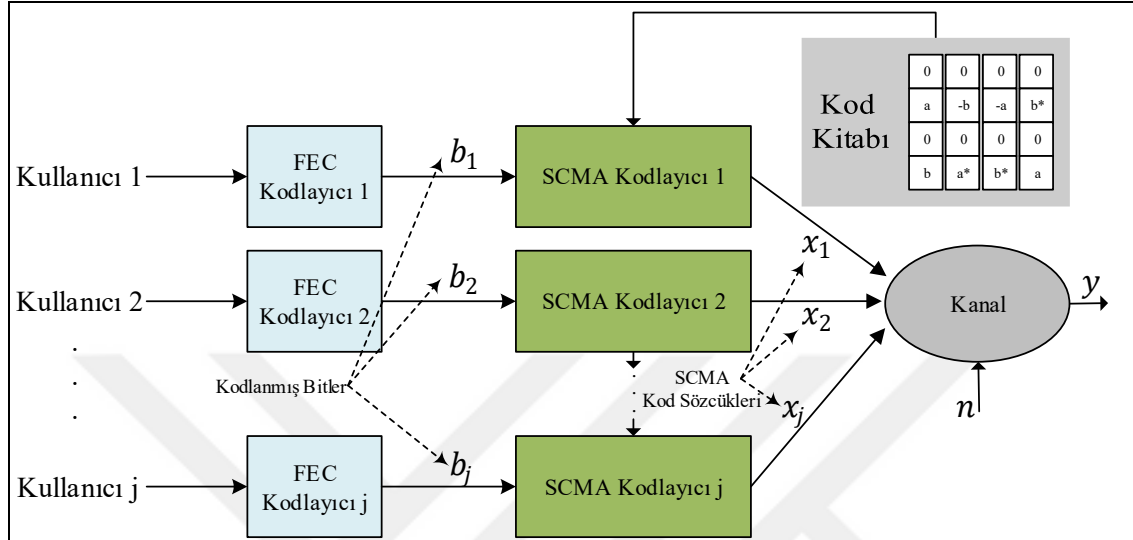
### 3. SEYREK KOD ÇOKLU ERİŞİM

Yeni nesil haberleşme sistemlerinde ortaya çıkan gereksinimlere yönelik 2013 yılında ortaya çıkan seyrek kod çoklu erişim (sparse code multiple Access, SCMA) yöntemi kod eksenli NOMA'da aday tekniklerdendir. Dik olmayan çoklu erişim sayesinde sınırlı kaynaklarla daha fazla kullanıcı barındırma potansiyeline sahiptir ve aşırı yüklemeyi destekler. LDS-CDMA'dan ilham alınarak geliştirilen SCMA güvenilir, düşük gecikmeli izinsiz iletişimi destekler ve makine tipi haberleşmesi sistem gereksinimlerini sağlar. Kanal sönümlemesi ve çoklu erişim girişimini engellemek için yayma dizileri yerine çok boyutlu takımyıldızlardan elde edilen kod kitapları kullanılır. Ana takımyıldızının farklı şekillerde yansıtılmasıyla oluşturulan çok boyutlu takımyıldızlarına dayalı olarak oluşturulan kod kitapları şekil verme kazancı sağlar (Nikopour ve Baligh, 2013; Taherzadeh, Nikopour, Bayesteh ve Baligh, 2014: 549). Alıcı kısımdaki mesaj geçiren algoritma (message passing algorithm, MPA) en uygun performansa yakın performans elde etmek için çoklu kullanıcı seziminde kullanılır.

Sonuç olarak daha fazla kodlama kazancı ve daha iyi spektrum verimliliği, LDS'ye kıyasla iyileştirilmiş kod kitapları nedeniyle SCMA'da elde edilebilir. Bir SCMA sisteminde, kullanıcılar aynı kaynak bloklarını düşük yoğunluklu bir şekilde kullanırlar, bu da alıcıda uygun maliyetli düşük çok kullanıcıli bağlantı algılama karmaşıklığına olanak tanır. Sinyalin seyrekliği, çok sayıda eşzamanlı kullanıcı için bile küçük bir çakışma olmasına neden olur ve kodlara benzer yayılma kodlama tasarımı, aynı zamanda yayılma kazancı nedeniyle iyi bir kapsama ve parazit önleme özelliği sağlar (Vaezi, Ding ve Vincent Poor, 2018: 549). Diğer dik olmayan çoklu erişim teknikleri ile çeşitli yönleriyle kıyaslandığında yeni nesil haberleşme sistemlerinde ve teknolojilerinde kullanılma ihtimalinin yüksek olduğu aday bir yöntem olarak görülmüştür (B. Wang ve diğerleri, 2015).

### 3.1. Sistem Modeli

#### 3.1.1. Çoklu erişim yöntemi



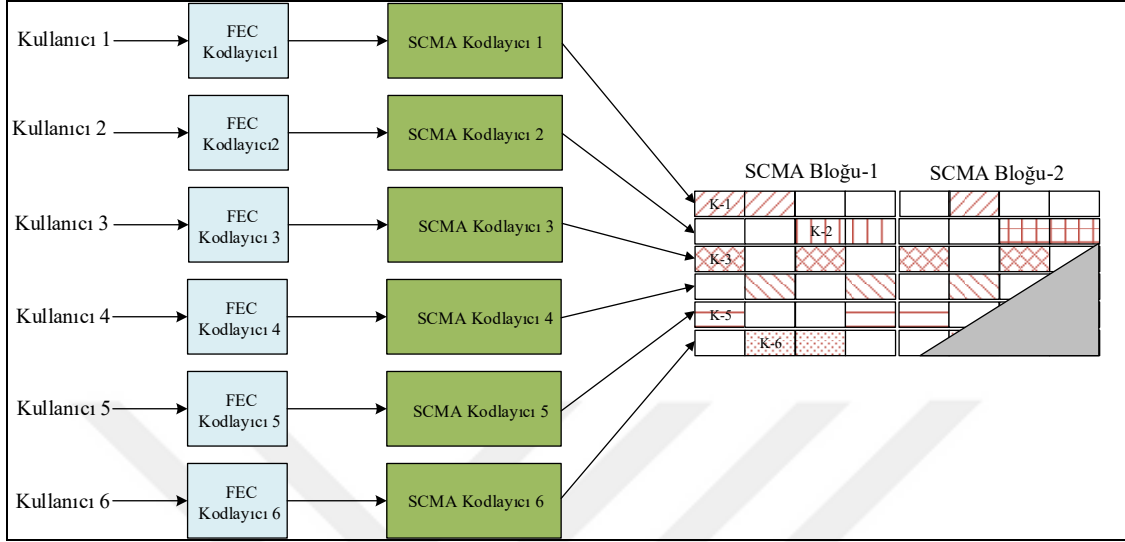
Şekil 3.1. SCMA verici yapısı

Kullanıcı sayısı  $J$  ve kaynak sayısı  $K$  olan bir SCMA sistemi olduğunu varsayalım. Her SCMA bloğu kod sözcüğü iletimi için  $K$  kaynaklarını işgal ettiğinden, sonuçta ortaya çıkan aşırı yükleme faktörü  $\lambda = J/K$  'dır. Burada yeni nesil haberleşme sistemindeki kitlesel bağlantı taleplerini karşılamak için aşırı yükleme (overloading) sabiti  $\lambda = J/K$  değeri 1'den büyük olmaktadır. Bu OMA tekniklerinin aksine NOMA tekniklerinin en önemli özelliğidir. Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi  $M$  kod kitabı boyutu olmak üzere Kullanıcı  $j$ 'den gelen bitlerden her  $\log_2 M$  ikili bitler; her bir kullanıcı için belirlenen kod kitaplarından karmaşık  $x_j$  kod sözcüklerine haritalanır. Kod sözcüğü  $x_j$ ;  $K$  boyutlu olmak üzere  $N < K$  sıfır olmayan elemana sahip seyrek vektördür. Baz istasyonunda  $K$  kaynaktan alınan sinyal  $y_k = [y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{Kj}]^T$  olmak üzere;

$$y = \sum_{k=1}^K \text{diag}(h_j) x_j + n \quad (3.1)$$

olarak ifade edilir. Burada kullanıcı  $j$ 'nin kod sözcüğü  $x_j = q_j(b_j) = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Kj}]^T$ , baz istasyonu ve kullanıcı  $j$  arasındaki kanal  $h_j = [h_{1j}, h_{2j}, \dots, h_{Kj}]^T$  ve  $n$  ise sıfır

ortalama  $\sigma^2$  varyansa sahip toplanabilir beyaz Gauss gürültü (AWGN) olarak tanımlanır.  $q_j$  ve  $b_j$  ise sırasıyla haritalama matrisi ve ikili dizi olarak ifade edilir.



Şekil 3.2. SCMA sistem modeli

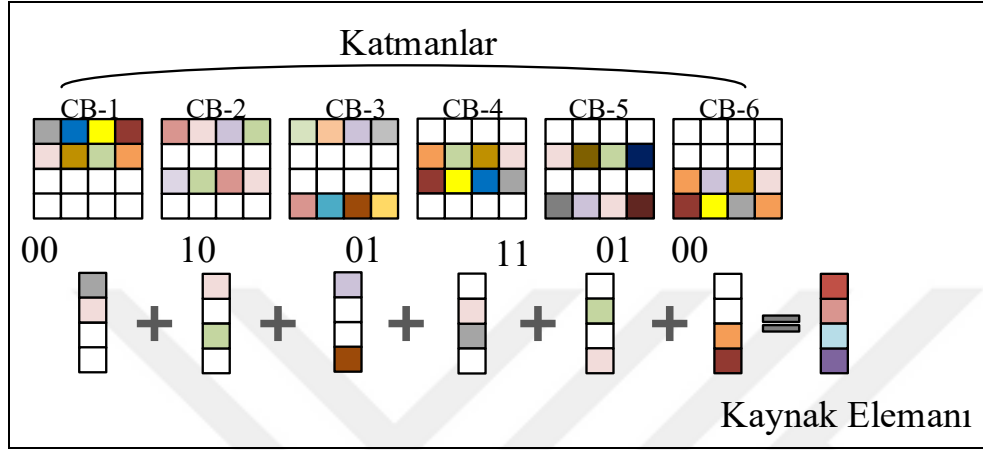
Her SCMA kodlayıcı, Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi kodlanmış bitleri bir  $K$  boyutlu karmaşık kod sözcüğüne eşler ve elde edilen  $J$  kod sözcükleri, bir SCMA bloğu oluşturur. Şekil 3.2.'de ve tezin geri kalanında  $J = 6$  ve  $K = 4$  olarak kabul edilerek tüm işlemler yapılmıştır.

### 3.1.2. SCMA kod kitabı haritalama

Kod kitabı tasarım, SCMA başarımını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Her bir kullanıcıya tahsis edilmiş olan kod kitapları vasıtasıyla farklı kod sözcüklerine haritalama yapılarak kullanıcıların verileri kodlanır ve alıcıya iletilir. Kod kitabının  $K$ -boyutlu karmaşık kod sözcükleri;  $N < K$  tane sıfır olmayan elemana sahip seyrek vektörlerdir ve tüm kod sözcükleri eşit sayıda 0 içerir. Kod kitapları;  $N$  boyutlu karmaşık takımyıldızdan bir haritalama matrisi ile haritalanarak oluşturulur. Bu haritalama matrisi  $q_j$  genel olarak şu şekilde belirlenmiştir (Kiracı, 2020):

$$q_j = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Haritalama matrisi  $q_j$ ,  $j$ . Kullanıcının kod kitabını oluşturmak için  $N$ -boyutlu takımyıldız noktalarını SCMA kod sözcükleri  $x_j$ 'ye haritalar. Ayrıca kod kitabındaki sütunlarda katmanlarda sıfır ve sıfır olmayan elamanların konumlarını göstermektedir. Örnek olarak bir kod kitabı haritalama işlemi Şekil 3.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. SCMA kod kitabı adresleme gösterimi

Burada 6 kullanıcı için 6 adet katman bulunmakta ve 6 adet kod kitabı kullanıcılara tahsis edilmiştir. Her kod kitabı 4 adet 4 boyutlu kod sözcüğü içerir ve kod sözcüklerinin 2 elemanı 0, geriye kalan 2 elemanı 0'dan farklıdır. Gelen bitlere göre katmanlarda kod sözcüklerinin etiketlenmesine bağlı olarak haritalama işlemi gerçekleştirilir. Çizelge 3.1.'de bahsettiğimiz özelliklerdeki sistem için tasarlanan 6 kullanıcı için kod kitapları verilmiştir.

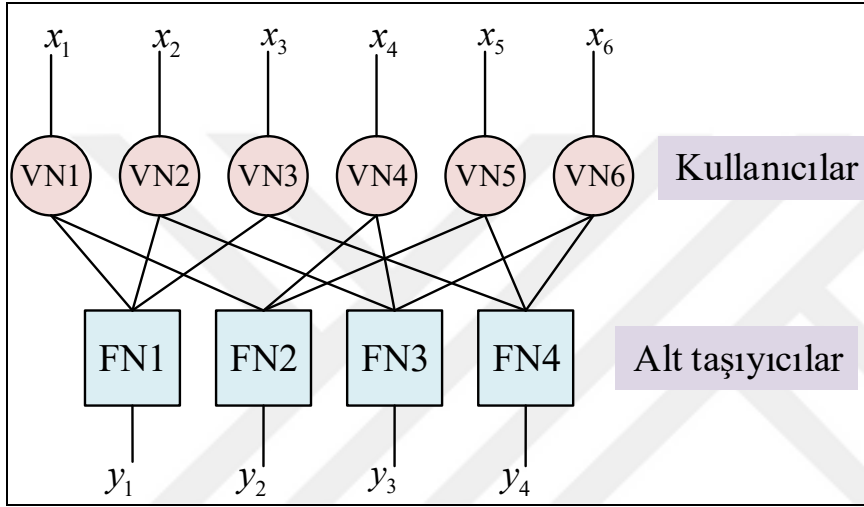
Çizelge 3.1. SCMA kod kitabı örneği

SCMA Kod kitabı Numarası	Kod Kitabı
Kod Kitabı-1	$\begin{bmatrix} 0.7851 & -0.2243 & 0.2243 & -0.7851 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.1815 - 0.1318i & -0.6351 - 0.4615i & 0.6351 + 0.4615i & 0.1815 + 0.1318i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Kod Kitabı-2	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.1815 - 0.1318i & -0.6351 - 0.4615i & 0.6351 + 0.4615i & 0.1815 + 0.1318i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7851 & -0.2243 & 0.2243 & -0.7851 \end{bmatrix}$
Kod Kitabı-3	$\begin{bmatrix} -0.6351 + 0.4615i & 0.1815 - 0.1318i & -0.1815 + 0.1318i & 0.6351 - 0.4615i \\ 0.1392 - 0.1759i & 0.4873 - 0.6156i & -0.4873 + 0.6156i & -0.1392 + 0.1759i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Kod Kitabı-4	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7851 & -0.2243 & 0.2243 & -0.7851 \\ -0.0055 - 0.2242i & -0.0193 - 0.7848i & 0.0193 + 0.7848i & 0.0055 + 0.2242i \end{bmatrix}$
Kod Kitabı-5	$\begin{bmatrix} -0.0055 - 0.2242i & -0.0193 - 0.7848i & 0.0193 + 0.7848i & 0.0055 + 0.2242i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.6351 + 0.4615i & 0.1815 - 0.1318i & -0.1815 + 0.1318i & 0.6351 - 0.4615i \end{bmatrix}$
Kod Kitabı-6	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7851 & -0.2243 & 0.2243 & -0.7851 \\ 0.1392 - 0.1759i & 0.4873 - 0.6156i & -0.4873 + 0.6156i & -0.1392 + 0.1759i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Yapılan haritalama ile kaynak elemanında farklı kullanıcılara ait sembollerin süper pozisyon ile üst üste bindirilerek iletim gerçekleştirilir. Kod kitaplarının seyrek olmasından dolayı çakışma olması durumunda semboller arası bozulma en aza indirgenir. Ayrıca takımyıldızının çok boyutlu olmasından dolayı spektral verimlilik artırılarak alıcıda karmaşıklık azaltılmış olur.

### 3.1.3. Çarpan grafiği gösterimi

SCMA kod sözcüklerinin düşük yoğunluklu yapısından dolayı LDPC kodlarına benzer bir faktör grafiği ile karakterize edilebilir. Kod kitabındaki sıfır ve sıfır olmayan elemanların konumlarını gösteren haritalama matrisi aynı zamanda katmanlar ve kaynak elemanları arasındaki ilişkileri belirtmek için kullanılabilir. Bu matrisin satırları kaynak elemanlarını, sütunları ise katmanları gösterir.



Şekil 3.4. Çarpan grafiği gösterimi (6 kullanıcı, 4 alt taşıyıcı)

Şekil 3.4.'de görüleceği gibi 6 adet değişken düğümü (variable node, VN) ve 4 adet fonksiyon düğümü (function node, FN) olan bir sistemde değişken düğümleri katmanları yani kullanıcıları, fonksiyon düğümleri ise kaynak elemanlarını temsil etmektedir. Eğer değişken düğümleri ve fonksiyon düğümleri arasında bir bağlantı varsa bu faktör grafiği matrisinde 1'e eşittir. Yani  $j$ . değişken düğümü  $k$ . fonksiyon düğümü arasında faktör grafiğinde bir bağlantı varsa  $q_{k,j} = 1$ 'dir. Ve Şekil 3.4.'de görülen faktör grafiğinin matrisi şu şekildedir:

$$q_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Eş. 3.3'te tasarlanan faktör grafiğine baktığımızda katmanlar yani kullanıcılar tarafından kod kitabına göre haritalama yapıldığında çakışmanın minimize edilmesi için bir tasarım

yapıldığı görülmektedir. Ayrıca faktör grafiğinin matrisinin satır ve sütunlarına baktığımızda her satırda 3 adet 1 olduğu ve her sütunda 2 adet 1 olduğu görülmektedir. Bunun anlamı ise her bir fonksiyon düğümünün 3 değişken düğümü ile ( $d_f = 3$ ) ve her değişkenin 2 fonksiyon düğümü ile ( $d_v = 2$ ) bağlı olduğudur. Bu bağlantı sayıları Şekil 3.4.'deki çarpan grafiğinden görüldüğü gibi kod kitabı tasarımı için önemli parametrelerdir.

Özet olarak; kod eksenli NOMA kapsamındaki SCMA'da farklı kullanıcılardan gelen çoklu kod sözcüklerinin süper pozisyon ile aşırı yüklemeyi destekleyen bir yapısının olduğu görülmektedir. Çok boyutlu takımyıldızları ile SCMA; daha iyi spektral verimliliğine sahiptir. Ayrıca seyrek kod sözcükleri sayesinde katmanlar arası bozulma en aza indirgenmiştir ve düşük alıcı karmaşıklığıyla daha fazla kod sözcüğünün çakışması tolere edilebilir. (Vaezi ve diğerleri, 2018: 549).

### 3.1.4. Çoklu kullanıcı sezimi

SCMA'da alıcı kısmında çoklu kullanıcı sezimi için genel olarak karmaşıklığı daha az olduğu için MPA kullanılır. Bu bölümde optimal ve optimala yakın olan MPA tabanlı çoklu kullanıcı sezim yöntemleri açıklanacaktır.

#### Optimal Çoklu Kullanıcı Sezimi

Eş. 3.1'de alınan sinyal olan  $y$  sinyalinde kanal durum bilgisinin alıcıda mükemmel bir şekilde tahmin edildiğini varsayalım. Eşitliği kolay anlaşılabilir olması açısından şu şekilde yazabiliriz:

$$y = HX + n \quad (3.4)$$

Çok kullanıcılı kod sözcüğü olan  $X$  için optimum MAP (maximum a posteriori probability) sezimi;

$$\hat{X} = \arg \max_{x_j \in \mathbb{X}_j, \forall j} p(X|y) \quad (3.5)$$

olarak ifade edilir. Ayrıca  $j$ . kullanıcının kod sözcüğü olan  $x_j$

$$\hat{x}_j = \arg \max_{x_j \in \mathbb{X}_j} \sum_{x_i \in \mathbb{X}_i, \forall i \neq j} p(X|y) \quad (3.6)$$

olarak ifade edilir. Bayes'in kuralı kullanılarak;

$$p(X|y) = \frac{p(y|X)p(X)}{p(y)} \propto p(y|X)p(X) \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilir. Burada;

$$p(X) = \prod_{j=1}^J p(x_j) \quad (3.8)$$

$$p(y) = \sum_{x_j \in \mathbb{X}_j} p(y|X) p(X) \quad (3.9)$$

$p(X)$ ; her kullanıcının eşit olarak iletileme ihtimali olan kod sözcüğünün bağlı ön olasılığı ve  $p(y)$ ; alınan sinyal vektörünün olasılığını temsil etmektedir.

$K$  kaynak elemanları üzerindeki gürültü bileşenlerinin i.i.d. (identically independently distributed) olduğunu varsayarak;

$$p(y|X) = \prod_{k=1}^K p(y[k]|X) \quad (3.10)$$

Ve yalnızca  $d_f$  kullanıcının  $k$ . kaynak elemanı üzerinden çakıştığını düşünürsek;

$$p(y[k]|X) = \frac{1}{\pi N_0} \exp\left(-\frac{1}{N_0} |y[k] - \sum_{j \in \emptyset_k} h_j[k] x_j[k]|^2\right) \quad (3.11)$$

olarak yazılır. Bu sebeple  $j$ . Kullanıcının kod sözcüğü için MAP kararı Eş. 3.10 ile bulunur.

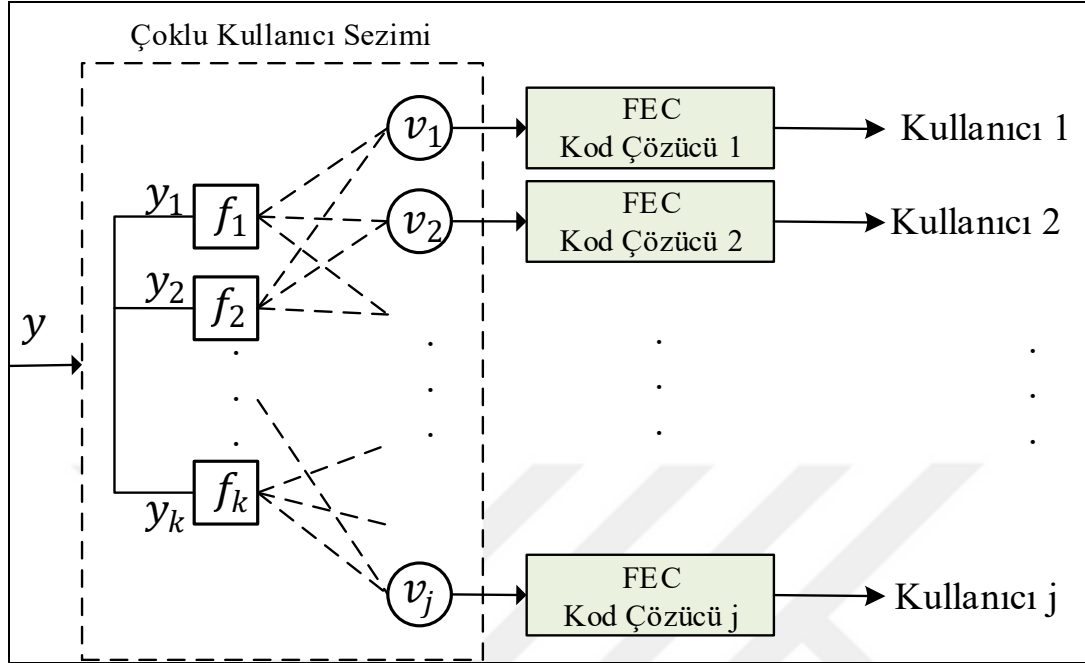
$$\hat{x}_j = \arg \max_{x_j \in \mathbb{X}_j} \sum_{x_i \in \mathbb{X}_i, \forall i \neq j} p(X) \prod_{k=1}^K p(y[k]|X) , \forall j \quad (3.12)$$

Her kullanıcının kod sözcüklerinin olasılıklarını bulduktan sonra logaritma benzerlik oranı (log-likelihood ratio, LLR) bulmak için FEC çözücünün girişleri olarak bu olasılıklar kullanılır.  $j$ . kullanıcı için  $m$ . bitinin  $b_{j,m}$  LLR'si hesaplanması aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \Lambda(b_{j,m}) &= \log \frac{\Pr\{b_{j,m} = 1|y\}}{\Pr\{b_{j,m} = 0|y\}} \\ &= \log \frac{\sum_{x_j \in \mathbb{X}_{j,m}^1} \sum_{x_i \in \mathbb{X}_i, \forall i \neq j} p(x) \prod_{k=1}^K p(y[k]|X)}{\sum_{x_j \in \mathbb{X}_{j,m}^0} \sum_{x_i \in \mathbb{X}_i, \forall i \neq j} p(x) \prod_{k=1}^K p(y[k]|X)} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Burada  $\mathbb{X}_{j,m}^1$  ve  $\mathbb{X}_{j,m}^0$ ,  $\mathbb{X}_j$ 'nin  $j$ . kullanıcı  $m$ . bitleri olan  $b_{j,m} = 1$  ve  $b_{j,m} = 0$  bitlerinin alt setleridir. Bu eşitlikte dikkat edilmesi gereken nokta Eş. 3.10'un çözümü MPF (marginal product function) problemi olmasıdır ve kullanıcı sayısının artması ile karmaşıklığının üstel olarak artmasıdır (Vaezi ve diğerleri, 2018: 549). Giriş kısmında bahsedildiği gibi bu karmaşıklığın artmasını göz önünde bulundurarak literatürde bu karmaşıklığı azaltmaya yönelik çalışmalar bulunmaktadır.

## MPA Sezimi



Şekil 3.5. SCMA alıcı yapısı

SCMA sisteminde mevcut olan seyrek kod kitapları sayesinde faktör grafiği ile temsil edilebilmektedir. Bu sebeple, MPF problemini çözmek için düşük karmaşıklığa sahip olan MPA en iyiye yakın bir performansla kullanılmaktadır. Şekil 3.5.'te SCMA alıcı yapısı görülmektedir.

MPA alıcısında ilk olarak alınan sinyal  $y_k$  ile  $k$ -düğümü için aradaki mesafe (3.12)'deki gibi ölçülür.

$$P_k(x_j) = \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma_n^2} \left\| y_k - \sum_{m \in \zeta_k} h_{km} x_{km} \right\|^2 \right\} \quad (3.14)$$

Daha sonra ölçülen mesafeye göre  $f_k$  fonksiyonel düğümler ve  $v_j$  değişken düğümleri (3.13) ve (3.14)'teki gibi güncellenir. Başlangıç olarak  $M$  kod sözcüğü sayısı olmak üzere  $I_{v_l \rightarrow f_k}^{t-1} = \frac{1}{M}$  olarak kabul edilir. Burada  $I_{f_k \rightarrow v_j}^t$  ve  $I_{v_j \rightarrow f_k}^t$  sırasıyla  $t$ . yinelemedeki fonksiyonel düğümlerden değişken düğümlere ve değişken düğümlerden fonksiyonel düğümlere geçen güncellemeleri veya dışsal bilgileri temsil eder.

$$I_{f_k \rightarrow v_j}^t(x_j) = \sum_{\sim x_j} (P_k(x_j) \times \prod_{\tilde{l} \in \xi_k \setminus \{j\}} I_{v_{\tilde{l}} \rightarrow f_k}^{t-1}) \quad (3.15)$$

$$I_{v_j \rightarrow f_k}^t(x_j) = \prod_{m \in \zeta_j \setminus \{k\}} I_{f_m \rightarrow v_j}^t(x_j) \quad (3.16)$$

Yineleme indisi  $t$  olmak üzere  $\xi_k$  ve  $\zeta_j$  sırasıyla  $k$ -satırı ve  $j$ -sütunundaki sıfır olmayanların pozisyonunun setidir. Yapılan bu hesaplamalar  $T$  yinelemeden sonra nihai çözümleme çıktısı (5)'teki gibi hesaplanır.

$$Q(x_j) = \prod_{k \in \zeta_j} I_{f_k \rightarrow v_j}^T(x_j), \quad x_j \in \mathbb{X}_j, \quad j = 1, \dots, J \quad (3.17)$$

Burada  $T$  sonlandırma işleminin olduğu yinele sayısıdır. MAP sezimine benzer olarak  $j$ . kullanıcı için  $m$ . bitinin  $(b_{j,m})$  LLR'si hesaplanması şu şekilde yapılır.

$$\Lambda(b_{j,m}) = \log \frac{\sum_{x_j \in \mathbb{X}_{j,m}^1} Q(x_j)}{\sum_{x_j \in \mathbb{X}_{j,m}^0} Q(x_j)} \quad (3.18)$$

Burada Eş. 3.11'deki gibi  $\mathbb{X}_{j,m}^1$  ve  $\mathbb{X}_{j,m}^0$ ,  $\mathbb{X}_j$ 'nin  $j$ . kullanıcı  $m$ . bitleri olan  $b_{j,m} = 1$  ve  $b_{j,m} = 0$  bitlerinin alt setleridir (Vaezi ve diğerleri, 2018: 549).



## 4. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA TABANLI KABLOSUZ HABERLEŞME

### 4.1. Giriş

Örnekleme, sinyal işleme ve iletişimin ve bunların uygulamalarının merkezinde yer alan yüksek pratik etkiye sahip bir konudur. Sinyalleri veya görüntüleri örnekleme için geleneksel yaklaşımlar Shannon'ın ünlü teoremini takip eder. Bu teorem; örnekleme oranı, sinyalde bulunan maksimum frekansın en az iki katı olmalıdır. Bu oran Nyquist oranı ve bu örnekleme frekansı Nyquist frekansı olarak adlandırılır. Bu teorem bilim dünyasında kabul edilmiş ve yaygın olarak kullanılmıştır.

Sıkıştırılmış algılama (compressed sensing, CS) teorisi, sinyal işleme, istatistik, optimizasyon ve kablosuz iletişim dahil birçok disiplinler arası uygulama alanında uygulanan bir teknolojidir. CS, bir sinyalin seyrek veya sıkıştırılabilir olmasını kullanarak, Nyquist oranından çok daha düşük bir örnekleme hızıyla yeniden oluşturabilmesini savunan bir teoremdir. Giderek daha fazla uygulama ve teknoloji, kablosuz uygulamalardaki birçok sinyal türünün seyrek olduğunu gösterdiğinden, CS, yeni nesil kablosuz ağların tasarımında önemli bir bileşen haline gelmiştir.

CS, yeni bir sinyal işleme yöntemidir ve Nyquist örneklemesinden çok daha az ölçüm kullanarak seyrek sinyaller ile kodlamayı amaçlamaktadır. Birçok algılama yönteminde devrim yaratma potansiyeli nedeniyle bilim dünyasında büyük bir ilgi görmektedir. Örneğin, bilişsel bir radyo sisteminde, spektrum verimliliğini artırmak için, önce kullanılan spektrum ile kullanılmayan spektrumu ayırmak gerekir ki bu, bir spektrum algılama problemi haline gelir ve bu problemi çözmek için CS tekniklerinden faydalanılabilir.

Kablosuz haberleşme sistemlerinde geleneksel yöntemlerin yerine bahsedilen sebeplerden dolayı CS'nin kullanım alanları oldukça fazladır. Bu alanlardan bazıları; ultra geniş bant (ultra-wideband, UWB) sistemleri, hassas konumlandırma uygulamaları, bilişsel radyo ağları, kanal kestirimi ve çoklu erişim yöntemleridir.

UWB sistemleri kısa menzilli iletişim, sensör ağları gibi geniş kullanım alanları sebebiyle çok fazla uygulamaya sahiptir. Bununla birlikte, oldukça dar darbe genişliğinden dolayı

zaman alanında doğrudan örnekleme zorlaştırır ve bu alıcının tasarımını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, UWB sinyali zaman alanında dağılacak şekilde sıkıştırılabilir ve daha az örnek ile orijinal UWB sinyali yeniden oluşturabilir. Dar darbe genişliği (narrow impulse width) ve düşük görev döngüsü (low duty cycle), CS'nin uygulanmasını sağlayan zaman alanındaki seyrekliği sağlamaktadır. CS, vericide veya alıcıda aşağıdaki şekilde gerçekleştirilebilir: Vericide, UWB sinyali sıkıştırmak için bir filtre kullanabiliriz. Alıcıda, sinyal sıkıştırmayı tamamlamak için bir mikroşerit devresi veya bir dizi ilişkilendirici kullanabiliriz. UWB sinyali sıkıştırıldıktan sonra, örneklerden orijinal UWB sinyali yeniden oluşturabiliriz. Bu sebeple özellikle alıcı tarafta UWB sinyallerinin alım performansını iyileştirmek için CS teorisi kullanılmaktadır.

Hassas konumlandırma, robot cerrahisi gibi birçok uygulamada kullanılır. Santimetre veya milimetre düzeyinde konumlandırma olması önemli bir parametredir. UWB'nin kullanım alanlarından olup genellikle nesneden gönderilen ve birden çok baz istasyonunda alınan dar darbelerin analiz edilmesiyle elde edilir. Kesinlik gerekliliği, alınan darbelerin zamanlaması üzerinde baskın bir talep getirmektedir. Hassas konumlandırma için CS'nin doğrudan ve dolaylı uygulamaları mevcuttur. Doğrudan uygulamalarında temel sorun konumlandırma probleminin, seyrek bilinmeyen vektör içeren doğrusal bir eşitliği çözme probleminde nasıl dönüştürüleceğidir. Dolaylı uygulamalarında ise örneğin UWB tabanlı konumlandırmada sinyali elde etmeye yardımcı olmak için CS kullanılabilir. Bu uygulamalarla sistemlerin konumlandırma hızı ve hassasiyeti artırılmaktadır.

Yeni kablosuz hizmetleri ile sınırlı sayıda spektrum genişliği ile spektrum kıtlığı yaşanmaktadır. Spektrum kullanımının verimliliğini artırmak için, çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Bilişsel radyo, kablosuz kapasitede en büyük teknolojik kazancı sağlayan teknolojilerden biridir. Bilişsel radyo, lisanslı kullanıcılara atanan ancak belirli zamanlarda boşta duran spektrumların algılanması ve kullanılmasıyla, spektrum paylaşımı için önemli bir kolaylaştırıcı görevi görür. Bilişsel radyo ağlarında (cognitive radio networks), spektrum algılama dinamik spektrum paylaşımını sağlamak için önemli bir görevdir. Bilişsel radyo düğümlerinin algılama ve iletim ek yükünü azaltmak ve bilişsel radyo ağlarında işbirlikçi spektrum algılama için CS kullanılmaktadır.

Kablosuz kanallar, birçok iletişim sisteminin performansına temel sınırlamalar getirmektedir. Bir verici ve alıcı arasındaki iletişim genellikle buldukları ortamdaki

engeller tarafından yansıtılır, dağılır veya zayıflatılır. Kanal durum bilgisi, hem vericilerde hem de alıcılarda çok yollu kanal üzerinden yüksek hızlı kablosuz iletişim için büyük önem taşımaktadır. Geleneksel eğitime dayalı yöntemler genellikle, bilinen eğitim sembollerinin bir dizisini kullanarak zaman, frekans ve uzay alanlarında kanal yanıtını inceler ve daha sonra kanal yanıtı, doğrusal yeniden yapılandırma teknikleriyle alınan sinyallerden yeniden oluşturulur. Bununla birlikte, gittikçe daha fazla fiziksel ölçüm ve deneysel kanıt, pratikte karşılaşılan birçok kablosuz kanalın seyrek bir çok yollu yapı sergileme eğiliminde olduğunu göstermektedir. CS teorisindeki son gelişmelere dayanan seyrek (veya etkili bir şekilde seyrek) çok yollu kanalları tahmin etmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. CS tabanlı yaklaşımlar, geleneksel en küçük karelere dayalı eğitim yöntemlerinin belirlediğinden çok daha az enerji ve birçok durumda gecikme ve bant genişliği kullanarak bir hedef yeniden yapılandırma hatasını potansiyel olarak başarabilir.

Kablosuz iletişimde çoklu erişim teknikleri önemli bir yere sahiptir. Birden çok kullanıcıdan gönderilen sinyallerin çakışmasını önlemek için çoklu erişim teknikleri kullanılır. Bölüm 2’de bu çoklu erişim yöntemleri ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir. Dik çoklu erişim tekniklerinde farklı vericiler için kullanıcıları ayırt etmek dik olmayan çoklu erişim yöntemlerine göre oldukça kolaydır. Bu sebeple dik olmayan çoklu erişim tekniklerinde CS tabanlı çalışmalar yapılmaktadır. Burada seyreklik iki şekilde elde edilmektedir. Bunlardan ilki verinin seyrekliğidir. Yani her seferinde, vericilerin yalnızca küçük bir kısmının aktarılacak verileri vardır; Paketin farklı vericilere ulaşması rastgele olabileceğinden, aktif iletilen kümesi önceden bilinmemektedir. Bu aktif kullanıcıların sezimi CS ile yapılabilir. İkinci olarak ise gözlem seyrekliğidir. Yani vericilerdeki paketler karşılıklı olarak ilişkilendirildiğinde, alınan sinyal belirli bir alandaki seyrek bir vektörün doğrusal bir dönüşümü olarak da yazılabilir. Burada da yine aynı şekilde bu dönüşümü sağlamak için CS kullanılabilir.

Yukarıda anlatıldığı gibi CS teorisinden yararlanarak kablosuz haberleşmenin çeşitli problemlerine çözümler bulunabilmekte ve yeni yaklaşımlar ortaya atılmaktadır. Tezin Giriş kısmında da bahsedildiği gibi mevcut haberleşme sistemlerinde artan kullanıcı sayısı ile yeni nesil haberleşme sistemleri çalışmaları devam etmektedir. Bu sebeple dik olmayan çoklu erişim yöntemleri üzerinde yoğun olarak çalışmalar devam etmektedir. Dik olmayan çoklu erişim teknikleri incelendiğinde gelecekte özellikle yukarı bağlantı yönlü haberleşme için izinsiz haberleşme teknolojileri ön plana çıkmaktadır. Bu teknolojiler kapsamında

kullanılması muhtemel olan seyrek kod çoklu erişim tekniği özellikle yukarı bağlantı yönlü makine tipi haberleşmesinde kullanılması ön görülmektedir. Bölüm 3'te SCMA'nın yapısına baktığımızda alıcı kısmında MPA yapısı gereği kullanıcı sayısı arttıkça karmaşıklığı artmakta ve işlem yükünün artmasından kaynaklı olarak sistemsel yavaşlamalara sebep olduğunu görmekteyiz. Her kullanıcının aktif olmaması alıcıya gelen sinyalin seyrek olmasına neden olmakta ve bu sinyalin doğrudan alıcıda işlenmesi gereksiz bir işlem yüküne sebep olmaktadır. Ayrıca kod kitaplarının seyrek olmasından dolayı CS teknolojisi ile bu problemleri incelememiz tezin motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu kapsamda öncelikle MPA'nın yineleme sayısını azaltmaya çalışan bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntemin detayları Bölüm 5'te anlatılmıştır. Daha sonra makine tipi haberleşmesine yönelik aktif kullanıcı sezimine yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin detayları ise Bölüm 6'da anlatılmıştır.

Bu bölümde tez kapsamında önerilen 2 yenilikçi yöntemin temelini oluşturan sıkıştırılmış algılama teorisi tanıtılmıştır. CS teorisinin temelleri, gereksinimleri ve önemli CS tabanlı yöntemleri açıklanmıştır.

## 4.2. Sıkıştırılmış Algılama

Örnekleme; sinyal işleme ve haberleşme sistemleri için çok kritik öneme sahip bir konudur. Sürekli ve ayırık zamanlı dünyalar arasında bir geçiş olan örnekleme teoremi, Shannon tarafından ortaya atılmıştır (Targarona, 2010). Nyquist frekansı olarak da adlandırılan bu teoremden bir sinyali kayıpsız bir şekilde kurtarmak için örnekleme oranının veya frekansının sinyalde bulunan en büyük frekansın iki katı olması gerektiğini söyler. Analogdan sayısal geçişte Shannon teoremi uygulanır ve sinyal Nyquist hızında veya üzerinde örneklenir. Fakat Donoho, (2006); örnekleme teorisinin tam anlamıyla olmasa da psikolojik olarak yanlış olduğunu ve sıkıştırılmış algılama (compressed sensing, CS) veya sıkıştırılmış örnekleme (compressive sampling, CS) adında bir teori ile geleneksel yöntemlerden daha az ölçüm ile seyrek bir sinyali mükemmel olarak kurtarılacağını ileri sürmektedir. CS ile sinyal örneklenirken aynı zamanda sıkıştırılmış olur. Bu teoride aynı zamanda seyrek bir sinyalin girişlerini gözlemlemek için fazlaca sıfır içerdiğinden çok fazla güç harcamanın gerekli olmadığı ve yalnızca geri oluşturmaya izin veren birkaç ölçümün toplanması ile bu seyrek sinyalin temsil edilebileceği fikrine dayanmaktadır. Bu

fikirden yola çıkarak CS tabanlı yöntemler seyrek sinyalleri geri oluşturabilmek için ölçüm sayısını azaltmanın yollarını aramaktadırlar.

CS teorisinin ana fikrine kısaca değinecek olursak gerçek değerli ve sınırlı uzunlukta olan ayrık zaman sinyal olan  $x \in \mathbb{R}^M$  sinyali  $\Psi = [\psi_1 \psi_2 \dots \psi_M]$  olan dönüşüm matrisi olarak da adlandırılan bir ortonormal tabanda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$x = \sum_{i=1}^M \psi_i \theta_i \quad (4.1)$$

Burada  $\theta = [\theta_1 \theta_2 \dots \theta_M]$  vektörü seyrek vektördür, yani çok az sıfır olmayan elemana sahiptir. Eşitlikleri daha basite indirgemek için matris notasyonunu kullanırsak;

$$x = \Psi \theta \quad (4.2)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $\Psi$  matrisi  $M \times M$  boyutlarında bir matristir. Bu eşitliklerde  $K$  adet sıfır olmayan elemana sahip bir başka deyişle  $K$ -seyrekliğe sahip olan  $x$  vektörü CS teorisine göre  $K$  tane ölçüm ile ifade edilebilmektedir.

#### 4.2.1. Seyreklik

Sıkıştırılmış algılama teorisi ile sinyalin tekrardan oluşturulması için bazı koşulların sağlanması gerekmektedir. Bunlardan bir tanesi olan seyreklik; bir sinyal için sahip olduğu bilgi hızının Nyquist hızından daha az örnekle yeniden oluşturulabilmesinin bir ölçüsüdür. Eğer sinyal seyrekse daha az tutarsız ölçüm kullanılarak yeniden oluşturulabilir. Sinyali oluşturan katsayıların bir kısmının atılmasıyla çok fazla bir kayıp olmaması sinyalin seyrek olduğunu göstermektedir. Sinyal bir ekseninde seyrek değilse başka bir ekseninde seyrek olabilir. Eğer  $x$  sinyali  $\Psi$  tabanında seyrekse  $\Psi$  tabanındaki  $K \ll M$  tane eleman ile  $x$  sinyali temsil edilir. Seyreklik sinyalin sıfırıncı normu olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\|\Psi x\|_{l_0} \leq K \quad (4.3)$$

Burada,  $l_0$  olarak adlandırdığımız sıfırcı norm,  $\Psi x$  ifadesindeki sıfır olmayan elemanların sayısını saymaktadır.

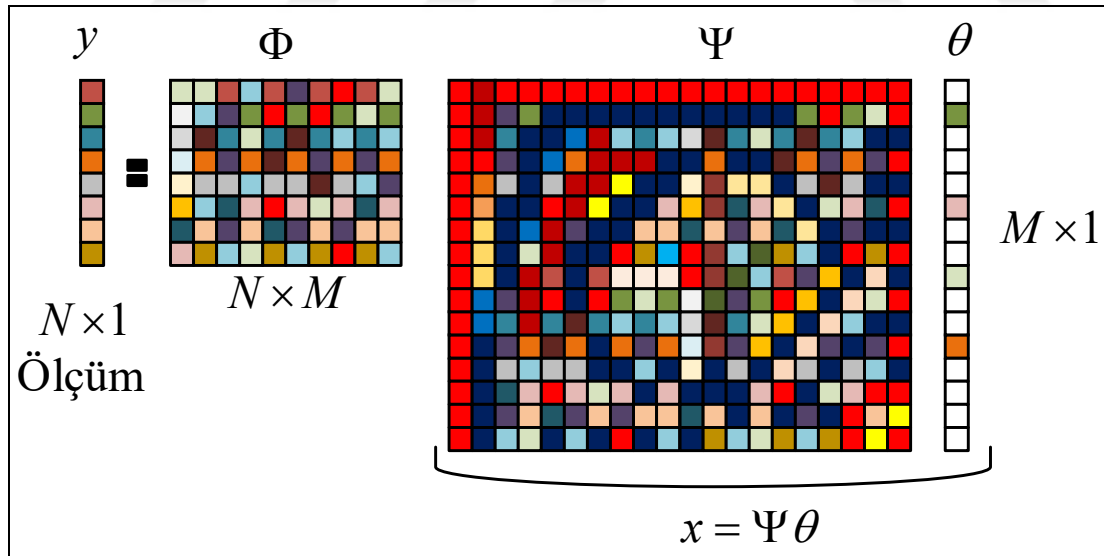
#### 4.2.2. Algılama ve tutarsızlık tanımı

CS teorisinden bahsederken sinyal seyrekse daha az tutarsız ölçümlerle sinyalin tekrardan oluşturulabileceğinden bahsetmiştik. Şimdi bu algılama ve tutarsızlıktan bahsedelim.

Yukarıda bahsettiğimiz sinyal için klasik doğrusal ölçüm modelini düşünelim.

$$y = \Phi x = \Phi \Psi \theta \quad (4.4)$$

Burada  $\Phi \Psi$ ,  $K$ -seyrekliğe sahip  $\theta$  vektörünü tahmin etmek için etkili ölçüm matrisini oluşturur. Ayrıca,  $\Phi$  matrisi ölçüm veya algılama matrisidir. Bu matrisin rankı  $x$ 'in rankı olan  $M$ 'den küçüktür.  $N \times M$  boyutlarındaki  $\Phi$  ölçüm matrisi  $x$ 'i yansıtarak ölçüm vektörü  $y$  elde edilir. Şekil 4.1.'de sıkıştırılmış algılamanın matematiksel gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.1. Sıkıştırılmış algılama matematiksel gösterimi

Tutarsızlık, ortonormal tabanın iç çarpımı ile ortonormal ölçüm matrisi arasındaki maksimum değer olarak tanımlanır. Karşılıklı bağımsız matrisleri ve dolayısıyla daha iyi sıkıştırıcı örnekleme sağlamak için düşük bir tutarsızlık değeri istenir. Tutarlılık şu şekilde ölçülebilir:

$$\mu(\Phi, \Psi) = \max_{\substack{1 \leq k \leq N \\ 1 \leq j \leq M}} |\langle \phi_k, \psi_j \rangle| \quad (4.5)$$

Bu eşitlik  $\Phi$  ve  $\Psi$  arasındaki en yüksek korelasyonu hesaplamaktadır. CS teorisinde sinyali doğru bir şekilde geri elde etmek için bu değer düşük olması yani tutarsızlık olması gerekmektedir.

### 4.2.3. Kısıtlı izometri özelliği

CS'deki problem esas olarak herhangi bir sıkıştırılabilir sinyaldeki göze çarpan bilgilerin boyutsal olarak azaltılmasıyla sinyaldeki gerekli örneklerin çıkarılmaması için uygun bir ölçüm matrisi tasarlamak ve sinyali tekrardan oluşturmak için bir algoritma geliştirmektir. Sinyalin daha az ölçümle tekrardan oluşturulabilmesi için bir diğer özellik kısıtlı izometri özelliği (restricted isometry property, RIP) olarak belirlenmiştir. Candes ve Tao, 2006 tarafından önerilen bu özellik ile CS ölçüm matrisinin kalitesini değerlendirmek mümkün kılınmıştır. Bu özellik;

$$(1 - \delta_s) \|\theta\|_{l_2}^2 \leq \|\Phi\Psi\theta\|_{l_2}^2 \leq (1 + \delta_s) \|\theta\|_{l_2}^2 \quad (4.6)$$

eşitliği ile tanımlanır. Burada,  $\delta_s$  0 ile 1 arasında izometri sabitidir. Ayrıca  $\|\cdot\|_{l_2}^2$  işlemi vektörün ikinci normudur. Sinyalin yeniden oluşturulması için bu şartın ölçüm matrisi  $\Phi$  tarafından sağlanması gerekmektedir. Ölçüm matrisi  $\Phi$  rasgele seçilirse RIP şartı büyük ihtimalle sağlanmış olmaktadır. Ayrıca Gaussian, Bernoulli ve kısmi rasgele Fourier matrislerinin bu önemli özelliğe sahip olduğu gösterilmiştir (Targarona, 2010).

### 4.2.4. Yeniden oluşturma problemi

Önceki bölümlerde kısıtlı izometri özelliği ve tutarsızlık özelliklerine sahip olan sinyal yeniden oluşturma şartlarını sağlamaktadır. Giriş kısmında da bahsedildiği gibi CS teorisinde temel problem daha az gözlemlenen örneklerle seyrek olan sinyali yeniden oluşturmaktır. Eş. 4.4'te bulunan eşitlikte eşitlik sayısından daha çok bilinmeyen olduğu için bu eşitliğin birden fazla çözümü bulunmaktadır. Sonsuz sayıda olan çözümlerden bizim için en önemli olan çözüm en seyrek olan çözümdür. Seyrek gösterimde ortaya çıkan

$\theta$  sinyalinin zaten seyrek olduğunu bildiğimizden amacımız sıfırdan farklı elemanlara sahip olan bir vektör bulmak olacaktır. Bu sebeple;

$$\min_{\theta} \|\theta\|_{l_0} \quad s. t. \quad y \approx \Phi\Psi\theta \quad (4.7)$$

eşitliği ile  $l_0$  normunda minimizasyonu ile bu en seyrek olan vektör bulunabilir. Fakat bu eşitlik hesaplama yükü çok fazla olduğu için NP-zor bir problem olarak uygulanabilir bir problem değildir.

Problem, Donoho, (2006) ve E. J. Candès, Romberg ve Tao, (2006) tarafından yapılan çalışmalarda  $l_1$  optimizasyonu ile neredeyse aynı sıkıştırılabilir vektörler oluşturularak seyrek vektörlerin tam olarak yeniden yapılandırılabilceği gösterilmiştir. Bu sebeple;

$$\min_{\theta} \|\theta\|_{l_1} \quad s. t. \quad y \approx \Phi\Psi\theta \quad (4.8)$$

eşitliği ile problem, dışbükey optimizasyonuna dönüştürülmüştür. Bu problemin yalnızca bir çözümü mevcuttur ve literatürde LASSO (least absolute shrinkage and selection operator) olarak adlandırılır (Tibshirani, 1996). Problemde  $\theta$  sinyali seyrek olduğunda ve belirli koşullarda ( $N > cK \log(M/K)$ ) yeniden oluşturulabilir. Bu koşullarda  $c = 22(\delta + 1)$  bir sabit olmak üzere  $K$  seyrekliğine sahip  $\theta$  sinyali RIP koşulunu da sağlamış olur.

Genel problemde sıkıştırılmış örnekler yanlış ölçümlerdir. Literatürde gürültüye duyarlı bir varyant bulunmakta olup yeniden oluşturma problemi;

$$\min_{\theta} \|\theta\|_{l_1} \quad s. t. \quad \|y - \Phi\Psi\theta\|_{l_2} \leq \epsilon \quad (4.9)$$

olarak değişmiş olur.

Belli bir  $\epsilon$  hatasına kadar çözüme ulaşılması gerekmektedir. Problemin çözümü için Öklid normu olarak da bilinen  $l_2$  normunu kullandığımızda optimizasyon problemi;

$$\min_{\theta} \|\theta\|_{l_2} \quad s. t. \quad y \approx \Phi\Psi\theta \quad (4.10)$$

olarak ifade edilebilir. Bu problemin analitik çözümü;

$$\theta = (\Phi\Psi)^H((\Phi\Psi)(\Phi\Psi)^H)^{-1}y \quad (4.11)$$

olarak çözümlenir. Öklid normu bu problem için çoğu durumda kötü sonuçlar vermektedir ve çözüm neredeyse hiç seyrek değildir. Bu sebeple  $l_1$  normu kullanılarak Eş. 4.8'deki bu problemin çözümü gerçekleştirilmektedir. Bu çözüm aynı zamanda taban arayışı (basis pursuit, BP) olarak da bilinir. Açgözlü (greedy) olarak adlandırılan yinelemeli algoritmalarından olan uyumlu arayış (matching pursuit, MP) algoritması da bu problemi yinelemeli olarak çözmek için kullanılır.

MP, ilk başta sıfırların vektörü ile başlar ve her yinelemede mevcut vektörü ölçüm veya sözlükteki en iyi elemanları seçerek günceller. Bu şekilde en iyi çözüme ulaşır. Temel bir yöntem olduğundan dolayı uygulaması kolay ve seyrek çözüm vermektedir. Yeniden oluşturma algoritmaları MP gibi aynı problemin daha verimli ve doğru olarak çözülmesi için geliştirilmiştir ve problem hala daha geliştirilebilecek çözümlere açıktır.

### 4.3. Yeniden oluşturma algoritmaları

RIP koşulu yalnızca sıkıştırılmış örneklere zarar vermeyecek şekilde teorik şartları sağlar fakat seyrek vektörün nasıl yeniden oluşturulacağını bize söylemez. Eş. 4.8'deki problemi çözmek için şuana kadar önerilen oldukça yöntem bulunmaktadır. Çözüm olarak önerilen  $l_1$  normu minimizasyon yaklaşımı genellikle optimal olarak hızlı olmayan doğrusal programlama yöntemleriyle çözülebilir. Alternatif olarak sinyalin destek kümesini yinelemeli olarak hesaplayan açgözlü algoritmaların kullanılması olabilir. Açgözlü algoritmalar genel olarak hesaplama açısından hızlıdır fakat kararlılık eksikliği ve yakınsama garanti etmemesi bu yöntemlerin dezavantajı diyebiliriz. Bu bölümde en önemli açgözlü algoritmalar açıklanmıştır.

#### 4.3.1. MP algoritması

Açgözlü algoritmalar arasında ilk olarak ortaya çıkan algoritma olan ve Mallat ve Zhifeng Zhang, 1993 tarafından önerilen uyumlu arayış (matching pursuit, MP) algoritması sinyalin yeniden oluşturulmasını optimize etmek için ölçüm matrisi veya sözlük olarak adlandırılan  $\Phi$ 'nin sütunları olan  $\varphi_i$  vektörlerinde ölçüm vektörü olan  $y$ 'nin seyrek gösterimlerini yinelemeli olarak arar. Çizelge 4.1.'de gösterildiği gibi ilk olarak vekil

ataması yapılarak bu vektörler  $\varphi_i$  vektörünün artık vektörüyle korelasyonudur ve seyrek olan  $x$  vektörünün kaba bir kestirimidir. Durma kriteri gerçekleşinceye kadar her bir yinelemede vekili maksimum yapan indis değeri  $\lambda$  ile  $x$  vektörü ve artık vektör güncellenir. Yinelemeler, önceden tanımlanmış bir atom sayısı (yani,  $K$ ) seçilene kadar veya kalıntı yeterince küçük olana kadar yürütülür. MP'nin en büyük dezavantajı sözlük sütunlarının dik olmayışının hesaba katılmamasıdır. Eğer alınan işaret sözlük üzerinde seyrek ifade edilemezse her yinelemede artık vektörü büyür ve algoritma aynı değerleri toplayarak sona erer ve yakınsama gerçekleşmez.

Çizelge 4.1. Uyumlu arayış algoritması

Girdi: $y, \Phi$
$\hat{x}_0 \leftarrow \mathbf{0}, \quad r_0 \leftarrow y, \quad t \leftarrow 1$
yinele
$\lambda_t \leftarrow \operatorname{argmax}_i \frac{\langle r_{t-1}, \varphi_i \rangle}{\ \varphi_i\ _2}$
$\hat{x}_{\lambda_t} = \hat{x}_{\lambda_t} + \frac{\langle r_{t-1}, \varphi_{\lambda_t} \rangle}{\ \varphi_{\lambda_t}\ _2^2}$
$r_t = r_{t-1} - \frac{\langle r_{t-1}, \varphi_{\lambda_t} \rangle}{\ \varphi_{\lambda_t}\ _2^2} \varphi_{\lambda_t}$
$t = t + 1$
koşul sağlandığında döngüden çık
Çıktı: $\hat{x}$

#### 4.3.2. OMP algoritması

Dik uyumlu arayış (OMP) algoritması basitliği ve işlem yükünün düşük olması sebebi ile en çok kullanılan açgözlü algoritmadır. Pati ve diğerleri, 1993 tarafından önerilen OMP; MP algoritmasını  $\Phi$ 'nin sütunlarının dik olmama durumunu ele alan aşamalı bir diklik koşuluyla geliştirir. Her yinelemede ölçüm sinyali kullanılarak oluşturulan artık vektörü ile en yüksek korelasyona sahip eleman bulunur. İndislerin optimum altı seçimini önlemek için alınan vektör  $y$ 'nin dik projeksiyonunu her yinelemeden sonra seçilen destek setine yapar. Bu şekilde kalıntının seçilen sütun setine dik olması garanti edilir Ve bu yeniden oluşturma için doğruluğu artırmaktadır.

Eş. 4.8’de global optimallik için sözlüğün tüm olası alt matrisleri üzerinde bir arayış olması gerekmektedir. Gözlem vektörü olan  $y$  vektöründe optimum kaba kuvvet (brute force) çözümü ile önce tüm olası 1-seyrek gösterimlerinin tümü yeterince küçük hata üretmede başarısız olursa, o zaman optimal çözüm tüm olası 2-seyrek gösterimleri araştırır. Optimal çözümde ortaya çıkan hata yeterince küçük olana kadar tüm  $K$ -seyrek gösterimlerde arayış sürer.

OMP’de ise global optimallikten ziyade yerel optimallik aranır. En iyi 1-seyrek gösterim ile başladıktan sonra tüm 2-seyrek gösterimlerin arayışı yerine önceden seçilmiş temsil vektörünü muhafaza eder. Aynı şekilde her yinelemede yerel olarak optimum olan bir destek vektörü ekler. Bu özellik küresel olarak optimumu garanti etmese de algoritmanın yineleme sayısını azaltarak işlem yükünü azaltır.

Çizelge 4.2.’den de görüleceği gibi OMP seçilen sütunlara dik olan kalıntı, algoritmanın her yinelemesinde  $\Phi$  sözlüğünün bir sütununa maksimum düzeyde eşleştirilmeye çalışılır.

Çizelge 4.2. Dik uyumlu arayış algoritması

Girdi: $y, \Phi$
$\hat{x}_0 = \mathbf{0}, \quad r_0 = y, \quad t = 1$
yinele
$\lambda_t \leftarrow \operatorname{argmax}_i  \langle r_{t-1}, \varphi_i \rangle $
$\Lambda_t = \Lambda_{t-1} \cup \{\lambda_t\}$
$\hat{x}_t = \Phi_{\Lambda_t}^\dagger y$
$r_t = y - \Phi \hat{x}_t$
$t = t + 1$
koşul sağlandığında döngüden çık
Çıktı: $\hat{x}$

#### 4.3.3. COSAMP algoritması

Sıkıştırılmalı örnekleme uyumlu arayış (compressive sampling matching pursuit, COSAMP) algoritması OMP algoritmasının genişletilmiş sürümü olarak Needell ve Tropp, 2009 tarafından önerilmiştir. Çizelge 4.3.’de görüldüğü gibi her yinelemede artık vektör kullanarak hesaplanan hatanın seyreklik değerinin 2 katı kadar en güçlü destek setini seçerek LS (least squares) yöntemi ile durma kriteri sağlanana kadar yinelemeler devam

eder. Algoritmada durma kriteri olarak çeşitli kriterler kullanılabilir. Bunlardan bazıları; maksimum yineleme sayısı, sinyalin belli bir enerji seviyesi veya artık vektörün enerjisinin belirli bir enerji seviyesinden az olması kriterleridir.

RIP'den esinlenerek geliştirilen yöntemde ölçüm matrisi  $\Phi$ 'nin RIP koşulunu sağladığı varsayalım.

Çizelge 4.3. Sıkıştırılmış örnekleme uyumlu arayış algoritması

Girdi: $\mathbf{y}, \Phi, K$
$\hat{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{0}, \quad \mathbf{r}_0 = \mathbf{y}, \quad t = 1, \quad \Lambda_0 = \emptyset$ yinele
$\mathbf{z}_t =  \Phi^T \mathbf{r}_{t-1} $
$\Omega_t = \text{supp}(\mathbf{z}_t, 2K)$
$\Lambda_t \leftarrow \Lambda_{t-1} \cup \Omega_t$
$\mathbf{b}_t \leftarrow \Phi_{\Lambda_t}^\dagger \hat{\mathbf{y}}$
$\hat{\mathbf{x}}_t = (\mathbf{b}_t, K)$
$\mathbf{r}_t = \mathbf{y} - \Phi_{\Lambda_t} \hat{\mathbf{x}}_t$
$t = t + 1$
koşul sağlandığında döngüden çık
Çıktı: $\hat{\mathbf{x}}$

#### 4.3.4. IHT algoritması

Çizelge 4.4. Yinelemeli sert eşikleme algoritması

Girdi: $\mathbf{y}, \Phi$
$\hat{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{0}, \quad \mathbf{r}_0 = \mathbf{y}, \quad t = 1$ yinele
$\hat{\mathbf{x}}_t = H_k(\hat{\mathbf{x}}_{t-1} + A^T(\mathbf{y} - A\hat{\mathbf{x}}_{t-1}))$
$\mathbf{b}_t = \Phi \hat{\mathbf{x}}_t$
$\mathbf{r}_t = \mathbf{y} - \mathbf{b}_t$
$t = t + 1$
koşul sağlandığında döngüden çık
Çıktı: $\hat{\mathbf{x}}$

Açgözlü bir diğer algoritma olan ve Herrity, Gilbert ve Tropp, (2006) tarafından önerilen yinelemeli sert eşikleme (iterative hard thresholding, IHT) algoritması Çizelge 4.4.'de görüldüğü ölçüm sinyali ile ölçüm matrisinin yansımasına katı eşikleme uygulayarak sinyali yeniden oluşturmaktadır. Her yinelemede önceki yinelemenin çıktısına etki eden bazı eşikleme işlemi gerçekleştirilir.





## 5. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA TABANLI ÇOKLU KULLANICI SEZİMİ

### 5.1. Giriş

Yeni nesil haberleşme teknolojileri ile birlikte ortaya çıkan aday çoklu erişim teknikleri ile ilgili detaylı bilgiler 1 ve 2. bölümlerde verilmiştir. Bu çoklu erişim tekniklerinden olan ve yakın gelecekte özellikle yukarı yönlü bağlantılı makine tipi izinsiz haberleşme sistemlerinde kullanılma ihtimali yüksek olan SCMA tekniği bilim dünyasında araştırmacıların üzerinde çalıştığı bir çoklu erişim tekniğidir.

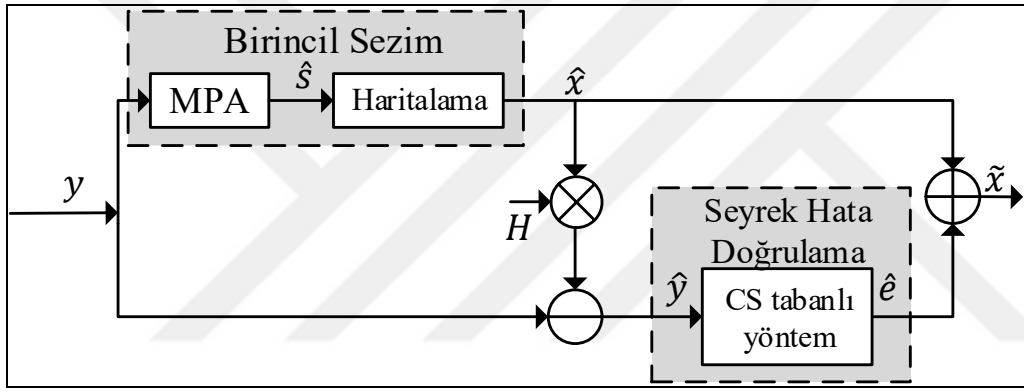
Seyrek kod kitapları ile aynı kaynak blokları üzerinden haberleşme yapılarak kullanıcılar arası bozulma azaltılır. Alıcı kısmında ise ML sezim performansına çok yakın bir başarıyı olan MPA kullanılmaktadır ve daha az karmaşıklığa sahiptir. Makine tipi haberleşmesinde kullanıcı sayısının yakın zamanda devasa bir şekilde artacağı düşünüldüğü zaman SCMA'nın alıcısı olan MPA'da karmaşıklık fazlasıyla artmaktadır. Bu karmaşıklığı azaltmaya yönelik literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar detaylı olarak Bölüm 2'de anlatılmıştır. Önemli fikirleri barındıranları özetleyecek olursak Yang ve diğerleri, (2017) tarafından önerilen yineleme sayısını azaltmaya çalışan, Han ve diğerleri, (2018); He ve diğerleri, (2018) tarafından önerilen karmaşık hesaplamaları mantıksal işlemlere dönüştürme fikrine dayanan ve Long ve diğerleri, (2016) tarafından önerilen daha önceden bilinen ve doğru olarak kod çözümü yapılmış mesajların tekrar iletilmesi fikrine dayanan çalışmalar mevcuttur. Ayrıca Gao ve diğerleri, (2018) tarafından önerilen CS-tabanlı açgözlü bir algoritmanın kullanıldığı bir çalışma mevcuttur.

Literatürde bulunan çalışmalar genel olarak MPA'nın işlem akışında değişiklikler yaparak hesaplama karmaşıklığını düşürmeyi hedeflemişlerdir. Tez kapsamında geliştirilen yöntemde Gao ve diğerleri, (2018) tarafından önerilen çalışmadan ilham alınarak CS teorisini kullanarak MPA'nın daha az yineleme ile aynı başarıya ulaşılmıştır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalardan ilki CS-tabanlı çoklu kullanıcı sezimi yöntemidir. Bu bölümde geliştirilen yöntem, bu yöntemin benzetim çalışmaları ve sonuçları açıklanmıştır. Geliştirilen yöntem 1 ulusal (Durak ve Ertug, 2019a) ve 1 uluslararası (Durak ve Ertug, 2019b) konferanslarda sunulmuş, tam metin olarak basılmıştır.

## 5.2. Önerilen Yöntem

MPA alıcısının ML başarı performansına yaklaşabilmesine rağmen pratik uygulamalar için kullanıcı sayısı arttıkça karmaşıklık artmaktadır. Bu sebeple CS teorisinden yararlanarak bu karmaşıklığın azaltılması hedeflenmiştir. Bölüm 4'te detaylı olarak anlatıldığı gibi CS teorisi seyrek olan bir sinyali Nyquist oranından daha az örneklerle yeniden oluşturma ile ilgilenmektedir. Dolayısıyla CS'yi uygulamak için seyrekliğinde içinde olduğu bazı şartların sağlanması gerekmektedir. Bu şartların yerine gelmesi ve problemin seyrek sinyali geri oluşturma problemine dönmesi için Şekil 5.1.'deki gibi bir yöntem geliştirilmiştir.



Şekil 5.1. Önerilen CS-tabanlı yöntemin yapısı (Durak ve Ertug, 2019b; Gao ve diğerleri, 2018)

CS teorisini kullanabilmek için problemi seyrek sinyali yeniden oluşturma problemine dönüştürmek için 2 aşamalı bir yöntem geliştirilmiştir. İlk aşamada birkaç yinelemeli MPA sonucunda iletilen sembolleri içeren  $\hat{s}$  sinyali elde edilir. Bu semboller tekrardan kod kitaplarından alınan kod sözcükleriyle haritalanarak  $\hat{x}$  vektörü elde edilir. Bu aşamaya birincil sezim aşaması denilmektedir. Daha sonra 2. aşamada ise birincil sezimden sonra oluşan  $\hat{x}$  vektörü kanala sokularak alıcıya gelen  $y$  sinyalinden çıkarılır. Elde edilen seyrek hata vektörü seyrek hata doğrulama işlemine sokulur ve bu işlem sonucunda sembol hataları iyileştirilmiş olur. Bu aşamaya ise seyrek hata doğrulama aşaması denir.

MPA alıcısı yineleme sayısı arttıkça daha iyi sezim gerçekleştirmektedir. Fakat yineleme sayısı arttıkça hesaplama yükü de artmaktadır. Artan hesaplama yükünün yanında MPA alıcısı belli bir yinelemeden sonra sembol hataları oldukça azalmaktadır. Bu sebeple iletilen  $x$  sinyali ile birincil sezim sonucunda elde edilen  $\hat{x}$  sinyali arasındaki hata vektörünün seyrek olduğu söylenebilir. Bu hata vektörü;

$$e = x - \hat{x} \quad (5.1)$$

olarak tanımlanır. Burada  $x$  sinyali iletilen SCMA kod sözcükleri olmak üzere  $\hat{x}$  sinyali ise birincil sezimde elde edilen sembollerin kullanıcıların kod kitaplarına göre yeniden haritalanarak oluşturulduğu sinyaldir. MPA'nın optimale yakın performansı olmasına rağmen hata vektörü birincil sezim sonrasında tamamıyla sıfır olmayabilir. Fakat bu vektörde sıfır olmayan eleman sayısı sıfır elemanlarına göre daha azdır. Bu sebeple hata sinyali seyrek sinyaldir. Birincil sezim sonrasında kanal durum bilgisiyle çoklanarak alınan sinyalden çıkarıldığında yeniden alınan sinyal  $\hat{y}$  oluşturulur. Bu sinyal;

$$\hat{y} = y - H\hat{x} \quad (5.2)$$

olarak hesaplanır. Alınan sinyal aynı zamanda şu şekilde ifade edilir:

$$y = Hx + n \quad (5.3)$$

Eş. 5.1 ve Eş. 5.3 birtakım işlemlerle Eş. 5.2'de yerine yazılırsa;

$$y = Hx + n - H\hat{x} \quad (5.4)$$

$$y = H(x - \hat{x}) + n \quad (5.5)$$

$$y = He + n \quad (5.6)$$

Görüldüğü gibi Eş. 5.6 ile elde edilen ifade seyrek sinyali yeniden oluşturma problemine dönüşmektedir. Bu problem Gao ve diğerleri, (2018) tarafından geliştirilen yöntemden farklı olarak Bölüm 4'te detayları ile anlatılan COSAMP kullanılarak çözümlenmiştir. Yöntemin adımları Çizelge 5.1.'de verilmiştir. COSAMP algoritmasının kullanıldığı seyrek hata doğrulaması ile seyrek sinyali yeniden oluşturma işleminden sonra yeniden sezilen kod sözcüğü vektörü;

$$\tilde{x} = \hat{x} + \hat{e} \quad (5.7)$$

işlemi ile elde edilir.

Çizelge 5.1. CoSaMP tabanlı seyrek hata doğrulama algoritması

Girdi: $\hat{\mathbf{y}}, \mathbf{H}, \mathbf{K}$
$\hat{\mathbf{e}}_0 = \mathbf{0}, \quad \mathbf{r}_0 = \mathbf{0}, \quad \mathbf{K} = \mathbf{0}, \quad t = 1,$ $\Lambda_0 = \emptyset$
yinele
$\mathbf{z}_t = \mathbf{H}^T \mathbf{r}_{t-1}$
$\Omega_t = \text{supp}(\mathbf{z}_t, 2\mathbf{K})$
$\Lambda_t = \Lambda_{t-1} \cup \Omega_t$
$\mathbf{b}_t = \mathbf{H}_{\Lambda_t} \setminus \hat{\mathbf{y}}$
$\hat{\mathbf{e}}_t = (\mathbf{b}_t, \mathbf{K})$
$\mathbf{r}_t = \mathbf{y} - \mathbf{H}_{\Lambda_t} \hat{\mathbf{e}}_t$
$t = t + 1$
koşul sağlandığında döngüden çık
Çıktı: $\hat{\mathbf{e}}_t$

Çizelge 5.1.'de görüldüğü gibi her yinelemede artık vektöre göre hatanın seyreklik değerinin 2 katı kadar en güçlü destek kümesini seçerek, LS ile durma kriteri gerçekleşene kadar yinelemeye devam eder. COSAMP'ın bu özelliğinden dolayı algoritma daha kısa sürede seyrek yaklaşıma yakınsar.

Durma kriteri olarak ise artık vektörün belirlenen eşik değerine göre durumu kullanılmıştır. Eğer artık vektör belirlenen eşik değerinden küçükse algoritma sona ermektedir. Bu kriter;

$$\|\mathbf{r}\|_2 < V_{\text{eşik}} \quad (5.8)$$

olarak belirlenmiştir. Artık vektörün 2. normu alınarak eşik değerine göre durumuna göre bakılmaktadır. Eşik değerinin belirlenmesinde gürültünün enerjisi kullanılmaktadır (Gao ve diğerleri, 2018). Bu enerji;

$$E = N \times \sigma^2 \quad (5.9)$$

eşitliği ile hesaplanır. Daha sonra eşik değeri şu şekilde hesaplanır:

$$V_{eşik} = \sqrt{N \times \sigma^2} \quad (5.10)$$

### 5.3. Performans Ölçümü

Tez kapsamında gerçekleştirilen bu yöntemin tüm performans analizleri MATLAB programlama dili kullanılarak yapılmıştır. Yapılan benzetimlerde sinyaller Rayleigh düz sönümlenmeli kanal üzerinden iletilmiş olup kod kitapları literatürde sıkça kullanılan yöntemlerle uyumlu olması açısından 6 kullanıcı için ve  $A_u$  ve diğerleri, (2014); Nikopour ve Baligh, (2013); Taherzadeh ve diğerleri, (2014) tarafından yapılmış çalışmalara benzer olarak tasarlanmıştır.

### 5.4. Değerlendirme Kriterleri

Geliştirilen yöntemin başarımını ölçmek için literatürde de sıklıkla karmaşıklık analizi ve sembol hata oranı (symbol error rate, SER) karşılaştırmaları yapılmaktadır. Tez kapsamında geliştirilen çoklu kullanıcı sezici için karmaşıklık analizi ve SER performans analizi yapılmıştır. Kod kitabı boyutunun  $C$  olduğunu ve her bir kullanıcının iletim yapma olasılığını aynı olduğunu varsayarsak  $j$ . kullanıcı için SER üst sınırı;

$$P_j(e) \leq \frac{1}{C_j} \sum_X \sum_{\hat{X}, \hat{X}_j \neq \hat{x}_j} P\{X \rightarrow \hat{X}\} \quad (5.11)$$

olarak hesaplanır (Bao, Ma, Xiao, Ding ve Zhu, 2018). Burada  $P\{X \rightarrow \hat{X}\}$ ; iletilen  $X$  sinyalinin MPA sonucunda sezim yapılan  $\hat{X}$  olarak alındığı ikili hata olasılığı (pairwise error probability, PEP),  $\hat{x}_j$  ise  $j$ . kullanıcıya ait olan sembol bileşenidir.

### 5.5. Karmaşıklık Analizi

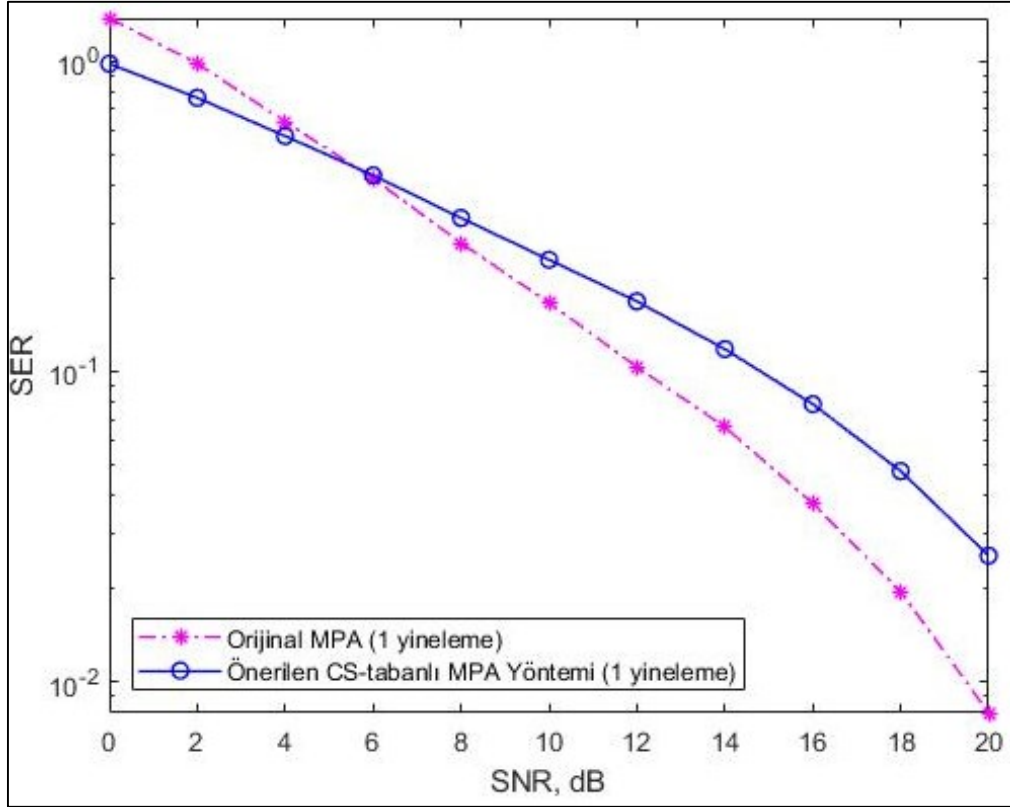
Geliştirilen yöntemde MPA ile COSAMP algoritmaları kullanıldığı için bu yöntemlerin karmaşıklığı yöntemin uygulamada kullanılabilir olmasını doğrudan etkilemektedir. İlk olarak MPA için çarpımlar cinsinden karmaşıklık ifadesi;

$$C_{MPA} = t \times (Nd_f M^{d_f} (2d_f + 1) + Kd_v M(d_v - 2)) \quad (5.12)$$

olarak gösterilmektedir. Burada;  $t$  yineleme sayısı,  $d_f$  ve  $d_v$  ise sırasıyla fonksiyon ve değişken düğümleri derecelerdir. Ayrıca  $K$  kaynak elemanın,  $M$  kod kitabı boyutunu ifade etmektedir. İfadeyi sadeleştiresek  $O(tNd_f^2M^{d_f})$  olarak düşünebiliriz. Aynı şekilde oldukça hızlı olan COSAMP algoritmasının da sadeleştirilmiş en kötü durum maliyeti (worst-case cost) karmaşıklık ifadesi  $O(mN)$  olarak hesaplanmaktadır (Needell ve Tropp, 2009). Burada  $m$  ölçümlerin sayısını,  $N$  ise sinyalin uzunluğunu göstermektedir. Geliştirilen yöntemde öncelikle MPA bir veya birkaç yineleme ile gerçekleştirilir. Daha sonra CS-tabanlı seyrek hata doğrulaması gerçekleştirilir. Yöntemler sırayla gerçekleştirildiğinden karmaşıklık olarak birbirlerinin karmaşıklığını arttırmaması geliştirilen yöntemin avantajlarından biridir.

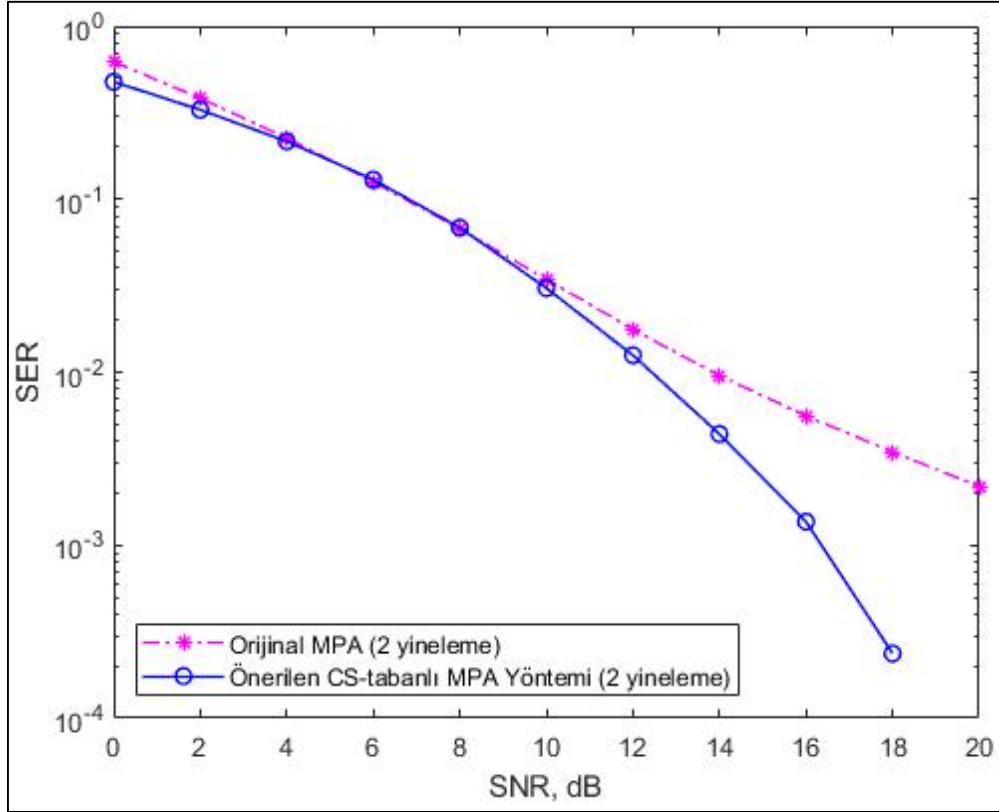
## 5.6. Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde önerilen algoritmanın ve orijinal MPA'nın SER performansını ve karmaşıklığını analiz ettik. SER performansı ve çalışma süresi analizleri MATLAB programında yapılmıştır. Ayrıca hesaplama karmaşıkları da analitik olarak hesaplanarak yöntemin başarımlı performansına karşılık karmaşıklığı analiz edilmiştir. Benzetim çalışmalarında literatürde bulunan diğer çalışmalarla uyumlu olması açısından Taherzadeh ve diğerleri, (2014) tarafından önerilen kod kitapları kullanılmıştır. Ayrıca Rayleigh düz sönümlenmeli kanal üzerinden bir örnekte 1000 tane SCMA sinyali iletilmiştir. Bütün benzetimler yöntemin performansını daha doğru göstermek için Monte Carlo benzetimi kullanılmıştır.



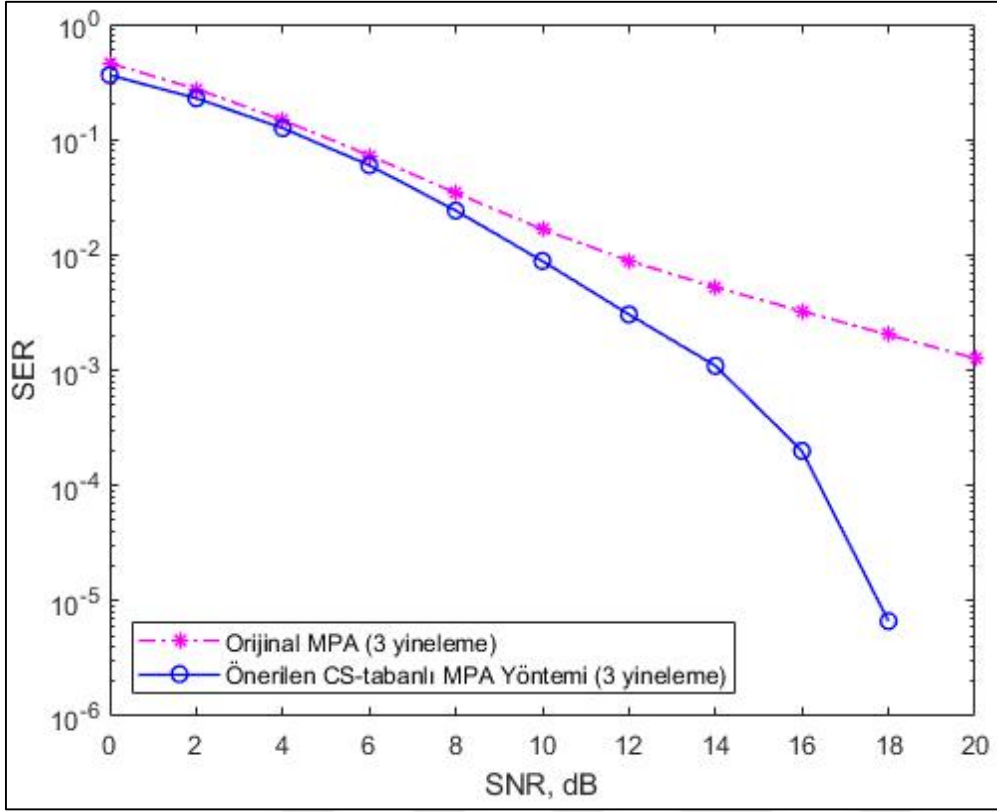
Şekil 5.2. Önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi (yineleme sayısı = 1)

Şekil 5.2.'de önerilen CS-tabanlı MPA ile orijinal MPA'nın yineleme sayısı 1 olduğunda SER performansları kıyaslanmıştır. Önerilen yöntem ilk başta orijinal MPA'dan 2 dB'lik bir kazanca sahiptir. SNR değerinin 6 dB değerinden sonra orijinal MPA'nın daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi yineleme sayısı 1 olduğunda MPA'nın başarılı bir şekilde mesajları çözmemesinden kaynaklı olarak hata vektörünün seyrek yapıda olmamasıdır. Hata vektörü seyrek olmadığı için geliştirdiğimiz CS tabanlı yöntem için problemimiz seyrek hata doğrulama problemine dönüşmemektedir. Bu sebeple performans olarak düşük bir performansa sahiptir.



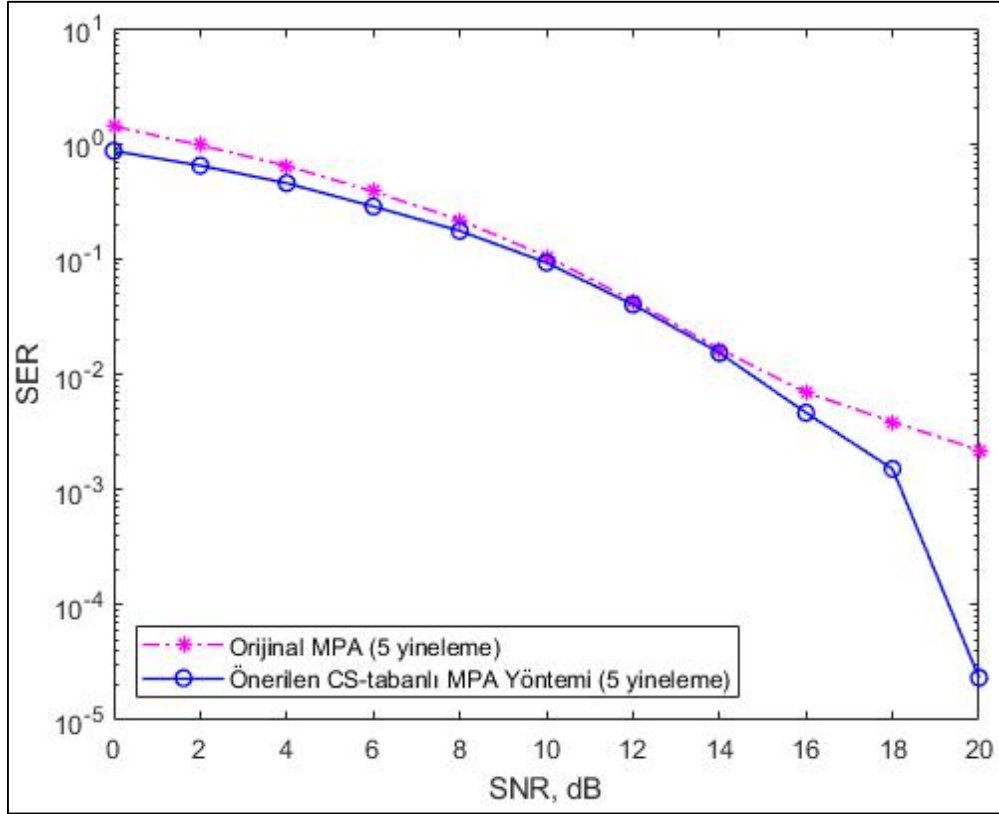
Şekil 5.3. Önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi (yineleme sayısı = 2)

Şekil 5.3.'te önerilen CS-tabanlı MPA ile orijinal MPA'nın yineleme sayısı 2 olduğunda SER performansları kıyaslanmıştır. Görüldüğü gibi orijinal MPA ve önerilen CS-tabanlı MPA yöntemlerinin SER performansı artmıştır. Fakat bir önceki grafikte görüldüğünün aksine önerilen yöntemin başarımı daha fazla artmıştır. Bunun sebebi hata vektörünün seyrek yapıya dönüşmeye başlamasıdır. Hata vektörü seyrek olduğu için önerilen CS-tabanlı yöntemin seyrek hata doğrulama problemine dönüşmektedir. Bu sebeple önerilen yöntem; SNR değeri arttıkça orijinal MPA'ya göre kazanımı artmaktadır. SNR değeri 10 dB olana kadar iki yöntemde performansları birbirine çok yakındır. Fakat 10 dB'den sonra önerilen yöntemin başarımı daha yüksektir. Ayrıca SNR değeri arttıkça önerilen yöntemin dB kazancı daha fazla artmaktadır. SNR değeri 12 iken önerilen yöntemin orijinal MPA'ya göre kazancı 1 dB iken, SNR değeri 16 iken kazanç 4 dB olmaktadır.



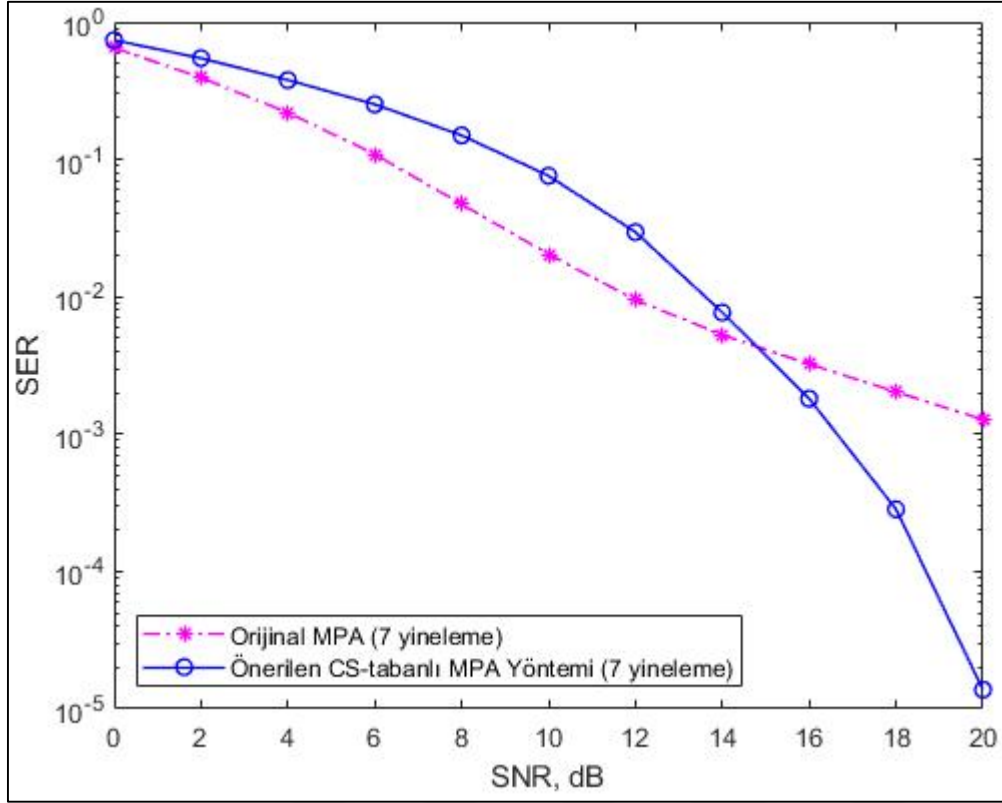
Şekil 5.4. Önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi (yineleme sayısı = 3)

Şekil 5.4.'te önerilen CS-tabanlı MPA ile orijinal MPA'nın yineleme sayısı 3 olduğunda SER performansları kıyaslanmıştır. Görüldüğü gibi önerilen yöntemin başarımı yineleme sayısı arttıkça orijinal MPA'ya göre daha fazla artmaktadır. Bunun sebebi yineleme sayısının artmasıdır. Yineleme sayısı arttığı için hata vektörü seyrek bir yapıya dönüşmüştür ve problem seyrek sinyali geri oluşturma problemine dönüşmüştür. Önerilen yöntem CS-tabanlı bir yöntem olduğu için sinyal seyrek olduğunda başarımının artması beklenen bir durumdur. Ayrıca SNR değeri 8 dB'den sonra önerilen yöntemin orijinal MPA'ya göre daha fazla dB kazancı olduğu görülmektedir.



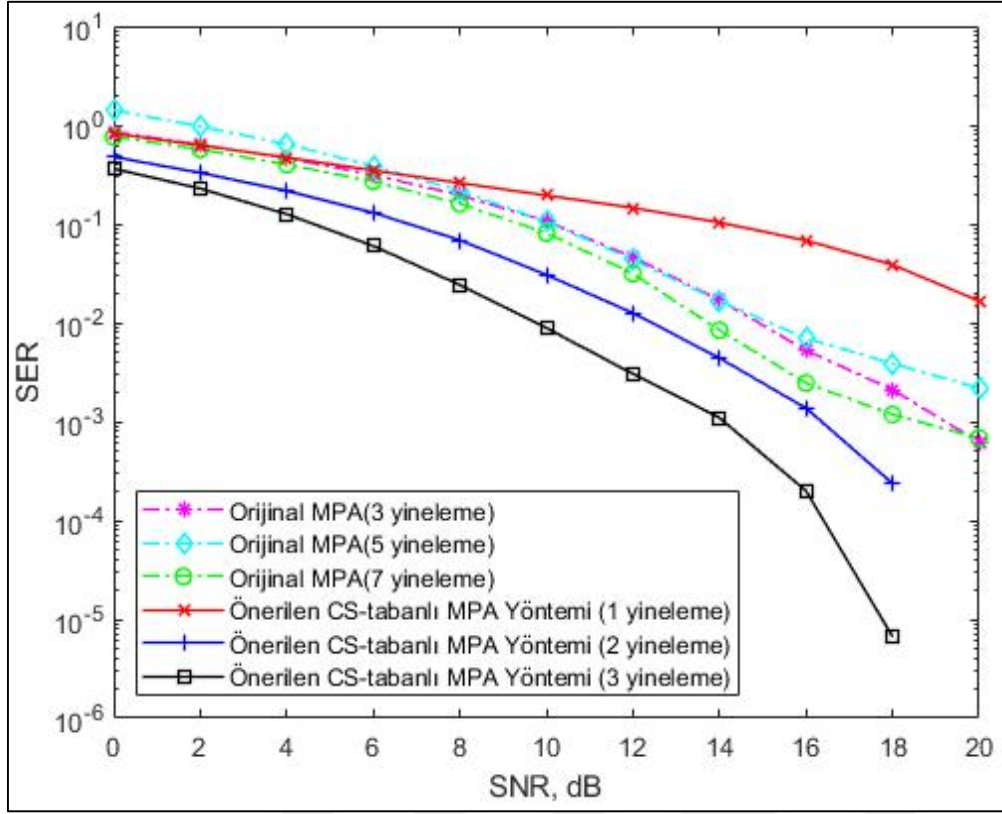
Şekil 5.5. Önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi (yineleme sayısı = 5)

Şekil 5.5.'te önerilen CS-tabanlı MPA ile orijinal MPA'nın yineleme sayısı 5 olduğunda SER performansları kıyaslanmıştır. Görüldüğü gibi önerilen CS-tabanlı MPA ve orijinal MPA'nın SER başarımları artmıştır. SNR değeri arttıkça önerilen yöntemin başarımları artmış olsa da kazanç farkı azalmıştır. Bunun sebebi orijinal MPA'nın yineleme sayısı arttıkça karmaşıklığının artmasıyla beraber performansının da kayda değer bir artış göstermesidir. Bununla beraber önerilen yöntemin de performansı artmıştır ve hata vektörünün seyrek yapısı daha fazla değişmediği için önerilen yöntemin başarımları daha fazla değişmemektedir. Fakat yine de grafikten de görüleceği gibi önerilen yöntemin ortalama 2 dB'lik bir kazancı bulunmaktadır.



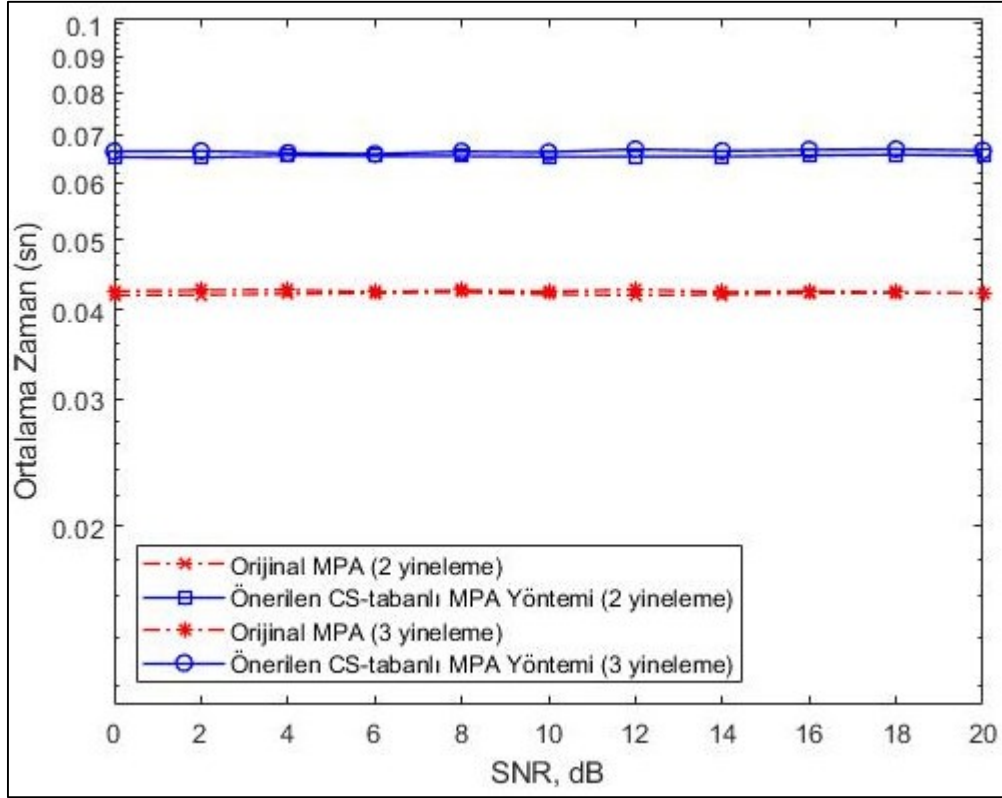
Şekil 5.6. Önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi (yineleme sayısı = 7)

Şekil 5.6.'da önerilen CS-tabanlı MPA ile orijinal MPA'nın yineleme sayısı 7 olduğunda SER performansları kıyaslanmıştır. Grafikte görüleceği gibi düşük SNR değerlerinde orijinal MPA'nın başarımı yüksek iken SNR değeri 15 dB'den sonra önerilen CS-tabanlı yöntemin başarımı daha yüksek olmaktadır. Bunun sebebi yöntemin kurgusunun seyrek hata üzerine kurgulanmasıdır. Eğer hata vektörünün seyrek yapısı özellikle yineleme sayısı arttıkça değişmemektedir. Bu sebeple önerilen yöntemin başarımı değişimi belli bir oranda azalmaktadır.



Şekil 5.7. Farklı yineleme sayılarıyla önerilen yöntem ve orijinal MPA'nın SER performans analizi

Şekil 5.7.'de önerilen CS-tabanlı MPA ile orijinal MPA'nın farklı yineleme sayılarında SER performansları kıyaslanmıştır. Daha önceki grafiklerde gösterdiğimiz analizlerin tek grafikte birleştirilmesinin sebebi önerilen yöntemin yineleme sayısını azaltarak başarı performansının belirgin olarak artırılmasını göstermektir. Görüldüğü gibi önerdiğimiz yöntemde yineleme sayısı 1 iken SER performansı oldukça düşüktür. Bunun sebebi seyrekliğin henüz olmamasıdır. Fakat diğer yineleme sayılarına baktığımızda orijinal MPA'nın yineleme sayısı 7 olduğunda önerilen CS-tabanlı yöntemin yineleme sayısının 2 olduğu başarımına yineleme sayısı 3 ve 5 olduğu durumlardan daha fazla yaklaştığı görülmektedir. Bu durumda önerilen yöntemin 5 yineleme daha az yineleme ile daha iyi performans gösterdiği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla tez kapsamında önerdiğimiz CS-tabanlı yöntemin daha az yineleme sayısı ile daha yüksek başarıma sahip olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 5.8. Orijinal MPA ve önerilen CS-tabanlı MPA algoritmasının farklı yineme sayıları ile ortalama algılama süresi karşılaştırması

Şekil 5.8.'de önerilen CS-tabanlı MPA ile orijinal MPA'nın farklı SNR değerlerinde ortalama çalışma süreleri kıyaslanmıştır. Orijinal MPA'nın önerilen CS-tabanlı yöntemle göre daha kısa çalışma süresi olduğu grafikten açıkça görülmektedir. Bunun sebebi önerilen yöntemin orijinal MPA'ya ek olarak bir işlem yükü olmasıdır. Aynı yineme sayılarındaki orijinal ve önerilen yöntemler arasındaki çalışma sürelerinde yaklaşık 0,02 sn olduğu grafikte görülmektedir. Fakat SER-SNR grafiklerinde görüldüğü gibi aynı yinlemeye sahip yöntemlerde önerilen yöntemin orijinal MPA'dan daha iyi performans gösterdiği açıktır. Ayrıca farklı yineme sayıları ile benzer SER performansı gösteren önerilen CS-tabanlı MPA ve orijinal MPA'ya baktığımızda önerilen CS-tabanlı algoritmanın 0,07 sn çalışma süresine sahip olduğu görülürken orijinal MPA'nın 0,09 sn çalışma süresine sahip olduğu görülmektedir.

Önerilen CS-tabanlı MPA ve orijinal MPA'nın karmaşıklık analizini çarpım sayısı bakımından Bölüm 5.5'te verilen eşitliğe göre yaptığımız zaman ise orijinal MPA'nın SER performansı en yüksek olan yineme sayısı 5 iken çarpım sayısı yaklaşık 27120 olmaktadır. Önerilen CS-tabanlı yöntem, yineme sayısı 3 olduğu zaman orijinal

MPA'nın yineleme sayısı 5 iken performansına daha yakın olmaktadır. Yineleme sayısı 3 iken önerilen yöntemin çarpım sayısı ise 21401 olmaktadır. Bu analizlere göre benzer performansı farklı yineleme sayıları ile gösteren yöntemlere karmaşıklık analizi yapıldığında önerilen yöntemin yaklaşık %22 daha az karmaşıklığa sahip olduğu söylenebilir.

### 5.7. Sonuç

Tez kapsamında geliştirilen bu çalışmada CS-tabanlı çoklu kullanıcı sezimi yöntemi tasarlanmıştır. Kod eksenli NOMA'da aday çoklu erişim yöntemi olan SCMA'nın alıcı kısmı olan MPA'da kullanıcı sayısı arttıkça karmaşıklık üstel olarak artmaktadır. Bu sebeple MPA'nın karmaşıklığını azaltmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Tez kapsamında yapılan bu çalışmanın da çıkış noktası bu karmaşıklığı azaltmaktır.

Yapılan çalışmada MPA'nın karmaşıklığını azaltmak için 2 aşamalı bir yöntem geliştirilmiştir. İlk aşamada birkaç yineleme ile birincil sezim yapılarak MPA sonucunda seyrek bir hata vektörü oluşturulmuştur. Daha sonra CS-tabanlı COSAMP algoritması kullanılarak seyrek hata doğrulama işlemi yapılmıştır.

Geliştirilen yöntemin performans ve karmaşıklık analizine bakıldığı zaman daha az yineleme ile orijinal MPA'ya göre daha yüksek başarıma sahiptir. Önerilen yöntem benzer performansa daha az yineleme ile ulaştığı için orijinal MPA'ya göre daha az karmaşıklığa sahiptir diyebiliriz. Aynı yineleme sayısında yöntemlere baktığımızda düşük SNR değerlerinde benzer performans gösterirken, yüksek SNR değerlerinde önerilen yöntemin orijinal MPA'ya göre daha fazla kazancı olduğu söylenebilir. Bütün bu kazanımlarının yanında seyreklik önbilgisine ihtiyaç duyması yöntemin en önemli dezavantajıdır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için MPA'nın yineleme sayısına göre hata vektörünün seyrekliği fazla olduğu için yapılan benzetimlerde seyreklik oranı algoritmanın başında yinelemeli olarak arttırılarak performansın yüksek olduğu seyreklikte seyrek hata doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen yöntem özellikle kullanıcı sayısının çok fazla olduğu yukarı yönlü bağlantılı makine tipi haberleşmesinde SCMA yöntemlerinde MPA'nın kullanıcı sayısı arttıkça artan karmaşıklığına engel olmak için kullanılabilir. Ayrıca CS teorisinden sadece seyrek sinyali

yeniden oluşturmak için yararlanılmayacağını ve problemin farklı şekillerde tasarlanabileceğini göstermesi açısından oldukça ilgi çekicidir. Bu özellikleri dikkate alındığında yöntemin kullanıldığı takdirde MPA başarımını artıracığı görülmektedir.



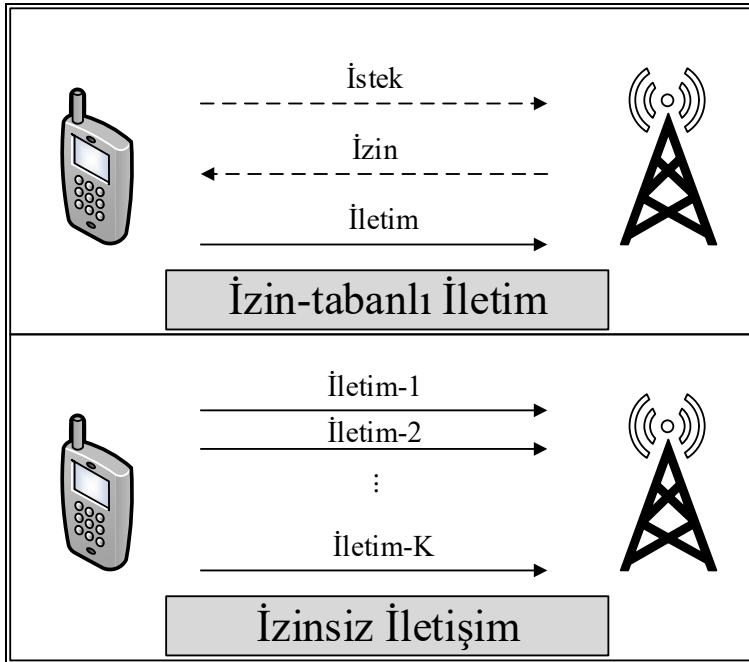


## 6. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA TABANLI AKTİF KULLANICI SEZİMİ VE KANAL KESTİRİMİ

### 6.1. Giriş

Yeni nesil haberleşme teknolojileri ile gelen bazı gereksinimler mevcut dik çoklu erişim teknikleri tarafından karşılanmamaktadır. Bu sebeple bu gereksinimleri karşılamak için yeni dik olmayan çoklu erişim teknikleri önerilmiştir. Önerilen bu çoklu erişimleri Bölüm 2’de detayları ile açıklanmıştır. Bunlardan kod eksenli olan SCMA’nın alıcı kısmı MPA kullanıcı sayısı arttıkça karmaşıklığı artan bir yapıya sahiptir. Kod eksenli SCMA’nın özellikle makine tipi haberleşmesi için kullanılması planlandığından karmaşıklığı azaltmak için yeni çalışmalar yapılmaktadır.

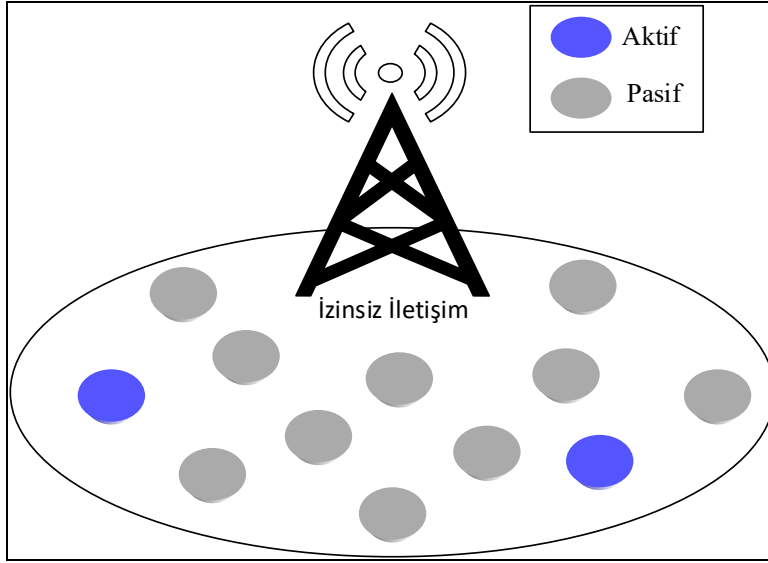
Geleneksel kablosuz haberleşme sistemlerinde istek-izin süreci bulunduğundan dolayı yukarı yönlü bağlantı iletişimi için aşırı sinyal yüküne ve haliyle gecikmelere yol açmaktadır. Bu durum 5G ve B5G servis kalitesi için uygun olmayan bir durumdur. Bu sebeple yukarı yönlü bağlantılı izinsiz çoklu erişim sistemleri bu iletim gecikmesini ve istek-izin sürecini azaltmak için önerilmiştir.



Şekil 6.1. İzin tabanlı ve izinsiz iletişimin gösterimi

Yukarı yönlü bağlantılı izinsiz çoklu erişim sistemlerinde kullanıcılar herhangi bir istek-izin süreci olmadan önceden tanımlanmış kaynakları kullanarak istedikleri zaman iletişim yapmaya yetkilidirler. Bu durum Şekil 6.1.'de temsili olarak gösterilmiştir. Yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA'da ise kullanıcılar kendi kod kitapları ve pilot dizilerini kullanarak herhangi bir istek izin prosedürü olmadan verilerini iletebilmektedirler. Önceden belirlenmiş kaynaklar çekişme iletim birimi (contention transmission unit, CTU) olarak tanımlanır ve bu birimde zaman, frekans, SCMA kod kitabı ve aktif kullanıcılar için pilot dizileri bulunmaktadır (Bayesteh ve diğerleri, 2014). Bu sebeple alıcının aktif kullanıcıyı tanıması, kanal kestirimi yapması ve bu bilgilere göre aktif kullanıcıların verisini çözümülemesi gerekmektedir.

Makine tipi haberleşmesinde aktif kullanıcı sayısı en yoğun saatlerde bile tüm kullanıcıların istatistiksel olarak %10'unu geçmemektedir (Tan, Ding, Yang, Pan ve Song, 2016). Bu durum Şekil 6.2.'de temsili olarak gösterilmektedir. Bu yüzden böyle haberleşme sistemlerinde tüm kullanıcılar; aktif olanların sıfır olmayan eleman, pasif olanların sıfır eleman olarak tanımlanabileceği seyrek sinyaller olarak düşünülebilir. Dolayısıyla tüm kullanıcıların verisini çözümlmek yerine sadece aktif kullanıcıların seziminin yapılması böyle sistemler için gerekliliktir. Çok az kullanıcının aktif olması aynı zamanda problemi seyrek sinyal problemine dönüştürmektedir. CS teorisi seyrek sinyali daha az bilgi ile yeniden oluşturma teorisi olduğundan bu teori aktif kullanıcıların sezimi ve kanal kestirimi için kullanılabilir. Aktif kullanıcılar sezilip bu kullanıcıların kanal durum bilgisi kestirildikten sonra MPA ile aktif kullanıcıların ilettiği veriler çözümlenebilir.



Şekil 6.2. İzinsiz iletişim gösterimi

Son yıllarda CS teorisi tabanlı bağlı kullanıcı aktivite ve veri sezimi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar Giriş bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır. Özetleyecek olursak, SCMA için aktif kullanıcı sezim yönteminin ilk örneklerinden biri Bayesteh ve diğerleri, (2014) tarafından yapılan çalışmada sunulmuştur. Bu çalışmada potansiyel bir aktif kullanıcı listesi bulunmakta ve detektör, aktif kullanıcıları tespit ederek potansiyel aktif kullanıcıların sayısını azaltır. Yöntemde dik pilot sinyaller farklı kullanıcılara tahsis edilir ve kullanıcıların aktivitesi alıcıdaki aktif kullanıcı sezici ile tespit edilir. Daha sonra JMPA ile yanlış tespit edilen aktif olmayan kullanıcılar listeden çıkarılır ve aktif kullanıcıların verileri çözülür. Daha sonra, B. Wang, Dai, Yuan, ve diğerleri, (2016) ve B. Wang, Dai, Zhang, Mir ve Li, (2016) tarafından yapılan çalışmalarda OMP ve CoSaMP, seyrek sinyal algılamaları için izinsiz NOMA iletişim sistemlerine uygulanmıştır ve bu algoritmalar düşük seyreklikte üstün performansa sahiptir. Fakat bununla birlikte, bu yöntemler potansiyel bir aktif kullanıcı listesi gerektirdiğinden, pratikte uygulanması olası değildir. Bu nedenle, Guo ve diğerleri, (2019); Liu ve diğerleri, (2017); F. Wang ve diğerleri, (2018) tarafından seyreklik bilgisi gerektirmeyen uygulaması pratikte mümkün olan yöntemler geliştirilmiştir. Kanal durum bilgisi AUD'den sonra hesaplanır ve aktif kullanıcıların verileri JMPA ile çözümlenir. Ek olarak, Guo ve diğerleri, (2019) tarafından algılama matrisini SNR durumuna göre optimize eden bir yöntem de geliştirilmiştir. Du ve diğerleri, (2018); B. Wang, Dai, Mir ve Wang, (2016) tarafından geliştirilen yöntemlerde bitişik zaman dilimlerinde aktivitenin değişmemesi durumunda aktif kullanıcı sezimi ve veri çözümlenme yöntemi geliştirilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar çatısı altında tez kapsamında SCMA sistemlerinde tasarlanan CS-tabanlı aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi için literatürdeki çalışmaların dezavantajlarına yönelik birkaç öncelikli nokta vardır. Birincisi; her bir zaman diliminde bir önceki zaman dilimindeki kullanıcıların aktivite durumu göz önüne alınmasıdır. Bunun sebebi bir kullanıcının aktivitesinin sürekli değişme olasılığı zayıftır. Bu sebeple zaman bloklar halinde iletim yapılacaktır. İkincisi; iletilecek pilot sinyalinin sistemde karmaşıklığı arttırmaması için farklı pilot uzunlukları ile spektral verimlilik artırılacaktır. Üçüncüsü; tasarlanacak AUD’de literatürdeki çalışmalarda bulunan ve dezavantaj olan kaba bir AUL dolayısıyla seyreklik ön bilgisine ihtiyacı olmamasıdır. Tasarlanan yöntemde ön bilgi olarak AUL’ye ihtiyaç duymadan AUD yapılması planlanmaktadır. Son olarak ve diğer yöntemlerden bir adım daha ileriye götürecek öncelik ise tasarlanan yöntemin dinamik ve seyrekliğe uyarlamalı bir yapısının olmasıdır. Bunun sebebi ise farklı sistemlerde aktif kullanıcı sayısı birbirinden çok farklıdır. Geliştirilecek yöntemin tüm servislerde kullanılması için performansının aktif kullanıcı sayısına dolayısıyla seyrekliğe bağlı olmaması gerekmektedir.

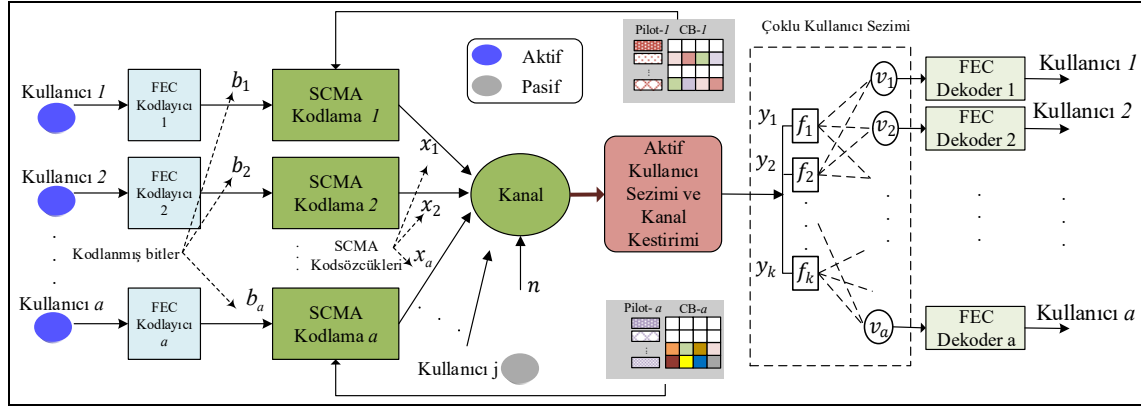
Tez kapsamında geliştirilen ikinci yöntemde şu katkılar yapılmıştır. Kitlesel bağlantının olduğu yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA sistemler için aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi yöntemi geliştirilmiştir. Bu çalışmada literatürde bulunan ve J. Xiao, Deng, Nie, Tian ve Jin, (2018) tarafından geliştirilen yöntemden ilham alınmıştır. Bu yöntemde güç eksenli NOMA için geliştirilen çoklu kullanıcı sezimi algoritması kavramsal değişikliklerle pilot sinyallere uygulanarak yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA sistemleri için dinamik ve seyreklik uyarlamalı sıkıştırılmış algılama tabanlı (dynamic and sparsity adaptive compressed sensing, DSACS) aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi algoritması olarak geliştirilmiştir. Önerilen yöntemde aktif kullanıcı sezimi, bitişik zaman aralıklarında gerçekleştirilmektedir. Ayrıca önerilen algoritma, kullanıcı aktivitesinin seyreklik düzeyini uyarlamalı olarak elde etmek ve doğru aktif kullanıcı grubunu genişletmek için aşamalı bir yaklaşım sergilemektedir. Daha doğru yeniden yapılandırma için her yinelemede doğru aktif kullanıcı kümesinin tahminini iyileştirmek için geri izleme (back-tracking) fikrini kullanır. Bu nedenle, hesaplama karmaşıklığını azaltmak ve performansı artırmak için aktif kullanıcı setlerinin zamansal korelasyonu kullanılır. Yani bir önceki zaman aralığında aktif kullanıcılar bir sonraki zaman aralığında da aktif olma ihtimali göz önünde bulundurulur. Önerilen yöntemde sıkıştırılmış algılama teorisinden yararlanarak sistemdeki aktif kullanıcıların sezimi gerçekleştirilmiş ve daha sonra bu kullanıcıların kanal kazanç bilgisi

de tahmin edilmiştir. Geliştirilen yöntem zaman bloklarında ayrıca işlemler yaparak bir önceki zaman dilimindeki aktif kullanıcıları da hesaba katarak karmaşıklığı düşürmeyi hedeflemektedir. Bunun sebebi de makine tipi haberleşmesinde bir kullanıcının bağlı zaman bloklarında aktivitesinin olmasıdır. Bu sebeple  $(t - 1)$ . zaman bloğunda aktif olan bir kullanıcının  $t$ . zaman bloğunda aktif olma ihtimali bulunmaktadır. Bu özelliği ile yöntem dinamiktir. Yöntemin bir diğer özelliği ise uyarlamalı bir yapıda olmasıdır. Seyrekliği ve dolayısıyla kullanıcıların aktivitesini adım adım uyarlamalı olarak sezerek nihai seyrekliğe yinelemeli olarak ulaşır.

Geliştirilen yöntemin bahsedilen bu motivasyondan yola çıkarak geliştirilmesi tez çalışmasının ikinci katkı bölümü olmaktadır. Sonraki bölümde aktif kullanıcı sezimi için yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA yapısı, veri ve pilot iletimini içeren sistem modeli, önerilen yöntemin detayları, benzetim çalışmaları ve sonuçlar detaylı olarak açıklanacaktır. Tez kapsamında geliştirilen DSACS tabanlı aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi yöntemi 1 adet SCI-expanded dergide kabul edilmiş, yayımlanma aşamasındadır (Durak ve Ertug, 2021).

## 6.2. Sistem Modeli

Geliştirilen bu yöntemde  $J$  tane potansiyel kullanıcının bulunduğu yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA sistemi tasarlanmıştır. Kullanıcılar istedikleri zaman diliminde aktif veya pasif olabilmektedirler ve bunun için herhangi bir istek-izin prosedürü bulunmamaktadır. Bu sebeple aktif kullanıcı sezimi önemli bir gereksinimdir. Genellikle aktivite tespiti ve kanal kestirimi için kullanıcılar veri sinyali ile birlikte pilot sinyalini de iletirler. Şekil 6.3.'te yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA vericisi ve alıcısının genel bir gösterimi mevcuttur.



Şekil 6.3. Yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA sistem modeli ( $J$  potansiyel kullanıcı,  $A$  aktif kullanıcı)

Tasarlanan sistemde  $J$  tane potansiyel kullanıcı,  $A$  tane aktif kullanıcı ve  $K$  tane dik kaynak elemanı bulunmaktadır. Burada, aşırı yüklenme oranının 1'den büyük olmasını sağlamak için  $K < A$  olarak tasarlanmıştır. Bu durum NOMA yöntemlerinin en önemli özelliğidir.

Şekil 6.3.'te görüldüğü gibi aktif kullanıcıların gelen bitleri önceden tanımlanmış kod kitaplarından doğrudan haritalanarak seyrek kod sözcüklerine  $x_j$  dönüştürülmektedir. Sıfır olmayan her eleman OFDMA alt taşıyıcılarına modüle edilerek alt taşıyıcılar üst üste bindirilir. Böylelikle farklı aktif kullanıcıların kod sözcükleri aynı zaman-frekans kaynakları kullanılarak iletilir. Kod sözcüklerinin seyrek olması kullanıcılar arası bozulmayı azaltır. Ayrıca bu sistemde her kod kitabı bir  $N_p$  pilot dizisiyle bağlantılıdır. Her kullanıcı pilot havuzundan kendi pilotunu seçer, doğrudan haritaladığı kod sözcükleri ve kendisine tahsis edilmiş pilot dizisi ile birlikte veri sinyalini kanal vasıtasıyla alıcıya iletir.

Alıcıya iletilen pilot sinyali;

$$y_p = \sum_{j=1}^J \alpha_j h_j \phi_j + w = \Phi h + w \quad (6.1)$$

olarak gösterilebilir. Burada,  $J$  potansiyel kullanıcılar kümesi,  $\alpha_j$ ,  $h_j$  ve  $\phi_j$  ise  $j$ . kullanıcının sırasıyla aktif veya pasif olduğunu gösteren bir gösterge, kanal durum bilgisi ve pilot dizisidir. Karmaşık beyaz Gauss gürültüsü  $w$ ; sıfır ortalama ve  $\sigma^2$  varyansa sahiptir. Kullanıcıların aktivite durumunu gösteren gösterge  $\alpha_j = 1$  ise kullanıcı aktif,  $\alpha_j = 0$  ise kullanıcı pasiftir. Ayrıca,

$$\Phi = [\phi_1, \dots, \phi_j] \quad (6.2)$$

$$h = [\alpha_1 h_1, \dots, \alpha_j h_j] \quad (6.3)$$

matrisleri de sırasıyla köşegen ve seyrek matrislerdir. Kanal matrisi seyrek olduğundan problemimiz  $\alpha_j = 1$  olan kullanıcıları bularak aktif kullanıcıların sezimi ve bu kullanıcıların kanal kestirimine dönüşmektedir.

Alıcıya iletilen veri (data) sinyali;

$$y_d = \sum_{j=1}^J h_j x_j + w \quad (6.4)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada,  $x_j$  iletilen vektör olmak üzere;

$$x_j = q_j(b_j) = [x_1, x_2, \dots, x_j] \quad (6.5)$$

olarak oluşturulmaktadır. Eşitlikte,  $q_j$  ve  $b_j$  sırasıyla haritalama ve ikili dizi matrisleridir.

Alıcıya gelen veri ve pilot sinyali Bayesteh ve diğerleri, (2014) tarafından yapılan çalışmada yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA sistemlerinde 3 aşamalı bir yöntemle sezim ve kestirimi gerçekleştirilmektedir. Bu aşamalar; aktif kullanıcı sezimi (AKS), kanal kestirimi (KK) ve bağlı-MPA (joint-MPA, JMPA) aşamalarıdır.

AKS aşamasında alınan pilot sinyalinden aktif kullanıcıların sezimi gerçekleştirilir. Eş. 6.1'de alıcıya gelen pilot sinyali;

$$y_p = [y_1, y_2, \dots, y_L] \quad (6.6)$$

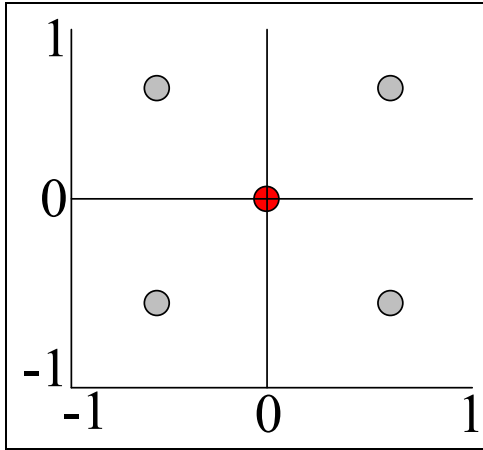
olmak üzere  $L$ ; sinyalin uzunluğudur. Alınan pilot sinyali tekrardan yazılacak olursa;

$$y_p = \Phi h + w$$

$$= \begin{bmatrix} \emptyset_{11} & \emptyset_{21} & \cdots & \emptyset_{J1} \\ \emptyset_{12} & \emptyset_{22} & \cdots & \emptyset_{J2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \emptyset_{1L} & \emptyset_{2L} & \cdots & \emptyset_{JL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 h_1 \\ \alpha_2 h_2 \\ \vdots \\ \alpha_J h_J \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_L \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

şeklinde yazılabilir. Bayesteh ve diğerleri, (2014) tarafından tasarlanan sistem modelinde AKS için pilot sinyali  $y_p$ 'ye Gorodnitsky ve Rao, (1997) tarafından tasarlanan FOCUSS gibi CS tabanlı bir algoritma uygulanır. Uygulanan yöntemde eğer  $|h_j^2|$  değeri belli bir eşik değerinden büyükse kullanıcı aktif olarak kabul edilmektedir. Bayesteh ve diğerleri, (2014) tarafından geliştirilen yöntemde eşik değeri 0.01 olarak belirlenmiştir. Aktif olarak belirlenen kullanıcıların kanal kazançları KK aşamasında kestirilir.

Kanal sönümlenmesi ve sinyal gürültüsünden dolayı bazı kullanıcılar yanlış olarak sezilmiş olabilmektedir. Yani yanlış olarak sezilmiş kullanıcılar aslında kullanıcının pasif olup AKS aşamasında aktif olarak sezildiği kullanıcılara denmektedir. JMPA aşamasında bu kullanıcıların aktivite durumunun düzeltilmesi gerçekleştirilir. Bu kullanıcılar pasif olarak alıcıya bildirildikten sonra alıcıda doğru olarak sezilmiş aktif kullanıcıların verileri çözümlenir.



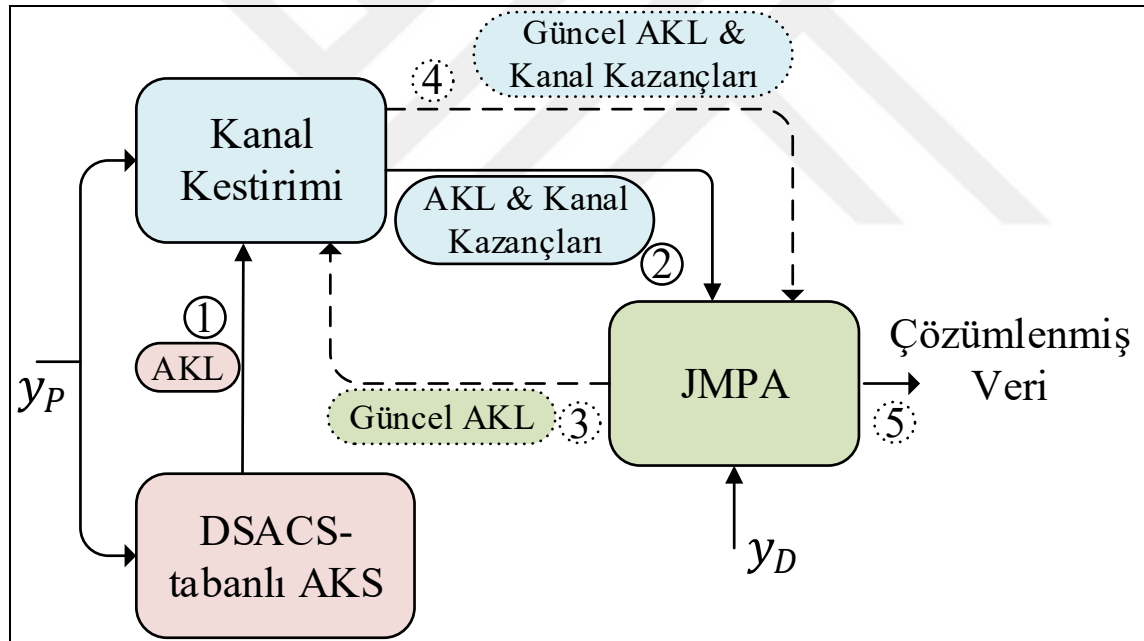
Şekil 6.4. Pasif kod kitabının sıfır takımı yıldız noktası ile gösterimi

JMPA aşaması Bölüm 3'te anlatılan MPA ile aynı işlemlere sahiptir. Fakat JMPA'nın en büyük farkı aktif olarak sezilmiş olan fakat aslında pasif olan yanlış sezilen kullanıcının sanal olarak bütün değerleri 0 olan sıfır kod sözcüğünü gönderdiği varsayımdır. Sıfır kod sözcüğü  $c_j^0 = 0$  olarak tanımlanır. Genişletilmiş kod kitabı ise Şekil 6.4.'te gösterildiği

gibi  $\bar{C}_j = C_j \cup c_j^0$  olarak tanımlanır. JMPA, MPA'dan farklı olarak genişletilmiş kod kitabı ile uygulanır ve eğer bir kullanıcı büyük olasılıkla sıfır kod sözcüğüne sahipse bu kullanıcı yanlış sezilmiş kullanıcı olarak düşünülür ve aktif kullanıcı listesinden çıkarılır. Aktif kullanıcı listesi güncellendikten sonra Bölüm 3'te detayları verilen orijinal MPA ile aktif kullanıcıların verileri çözülür.

### 6.3. Önerilen Yöntem

Bu bölümde tez kapsamında yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA sistemleri için geliştirdiğimiz aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi yöntemimizin detayları verilecektir. Literatürde bulunan çoğu yöntemin aksine önerilen yöntem seyreklik ön bilgisi, potansiyel aktif kullanıcı listesi gibi bilgiler gerekmeden aktif kullanıcı sezimi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 6.5. Önerilen DSACS-tabanlı AKS ve KK yöntemi

Şekil 6.5.'te görüldüğü gibi 1. aşamada dinamik ve seyrekliğe uyarlamalı sıkıştırılmış algılama tabanlı (dynamic and sparsity adaptive CS-based, DSACS-based) AKS ile aktif kullanıcı listesi (AKL) elde edilmiştir. Daha sonra 2. aşamada aktif olan kullanıcıların kanal kazançları kestirilip JMPA'da yanlış sezilen kullanıcılar elenir. 3. aşamada güncellenmiş AKL'deki aktif kullanıcıların kanal kazançları tekrardan kestirilir. Daha sonra 4. aşamada güncellenmiş AKL ve kanal kazançları tekrardan JMPA'ya gönderilir ve son aşama olarak bu kullanıcıların verileri JMPA ile çözülür.

Makine tipi haberleşmesinde tüm kullanıcıların yalnızca küçük bir kısmının aktif olması tüm kullanıcıların verisinin çözümlenmesinin gereksiz olmasına neden olmaktadır. Ayrıca kullanıcı sayısı arttıkça MPA'nın karmaşıklığı arttığı için sadece aktif kullanıcıların verilerinin çözülmesi karmaşıklığı azaltmaktadır. Kullanıcıların küçük bir kısmı aktif olduğu için seyrek bir yapıdan bahsedilebilir ve bu aktif kullanıcıları bulmak için CS-teorisinden yararlanılabilir.

Bölüm 4'te de bahsedildiği gibi seyrek sinyali yeniden oluşturmak için RIP şartının sağlanması gerekmektedir. Geliştirilen yöntemde literatürde bulunan diğer yöntemler gibi pilot matrisi  $\Phi$ 'nin RIP şartını sağladığı varsayılmıştır (E. Candès ve Tao, 2005). Ayrıca, sözde rasgele gürültüye dayalı Toeplitz matrisi RIP koşulunu yüksek olasılıkla sağlamaktadır (W. Dai ve Milenkovic, 2009). RIP koşulunu tekrardan bu problem için şu şekilde yazabiliriz:

$$(1 - \delta_k) \|h\|_2^2 \leq \|\Phi_j h\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|h\|_2^2 \quad (6.8)$$

Burada  $\delta_k \in (0,1)$ ; RIP sabitidir. RIP şartı pilot dizisinin  $k$  seyrekliğiyle yaklaşık olarak dik olduğunu gösterir.

Önerilen yöntemde yüksek oto-korelasyon ve düşük çapraz-korelasyon özelliklerinden dolayı pilot dizisi olarak Zadoff-Chu (ZC) dizileri kullanılmıştır (Guo ve diğerleri, 2019).

Bu diziler;

$$z_\mu(n) = e^{-j\pi\mu\frac{n(n+1)}{N_{ZC}}}, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (6.9)$$

eşitliğinde gösterildiği gibi oluştururlar. Burada;  $N_{ZC}$  dizinin uzunluğunu,  $\mu$  dizinin kökü veya indisini temsil etmektedir. Aynı köklere ait ZC dizilerinin dairesel kaymasıyla pilot havuzu oluşturulmuştur. Ve bu pilot sinyali Toeplitz matrisi olduğu için problemimiz RIP'yi sağlamaktadır ve problem seyrek sinyali yeniden oluşturma problemine dönmektedir.

MTC’de kullanıcılar genellikle tüm zaman dilimlerinden ziyade bağlı zaman dilimlerinde aktif olmaktadır. Bu sebeple geliştirilen yöntemde bir zaman dilimindeki aktivite oranını sezmek için bir önceki zaman dilimindeki aktivite göz önünde bulundurulmuştur. Bitişik  $t$  zaman dilimindeki alınan sinyal;

$$y^{[t]} = \Phi^{[t]}h^{[t]} + w^{[t]} \quad (6.10)$$

olarak basitçe gösterilebilir. Burada;  $y^{[t]}$ ,  $\Phi^{[t]}$ ,  $h^{[t]}$  ve  $w^t$  sırasıyla;  $t$ . zaman dilimindeki alınan pilot sinyalini, pilot dizisini, kanal matrisini ve Gauss gürültü vektörünü temsil etmektedir.



Çizelge 6.1. Önerilen DSACS-tabanlı AKS ve KK yöntemi

<p>Girdi: <math>\mathbf{y}_p^{[t]}, \Phi</math></p> <p><math>I_C = \mathbf{0}, \quad t = 1</math> yinele</p> <p>eğer <math>t = 1</math> ise <math>l = 1</math> değilse <math>l = \lceil  I_C /3 \rceil</math> eğer sonu <math>i = 1, I^{[t](0)} = I_C</math> <math>\hat{\mathbf{h}} = (\Phi_{I^{[t](0)}}^{[t]})^\dagger \mathbf{y}^{[t](0)}</math> <math>\mathbf{r}^{[t](0)} = \mathbf{y} - \Phi_{I^{[t](0)}}^{[t]}</math> koşul sağlanana kadar yinele</p> $\mathbf{P}^{[t](i)} = \max \left( \left  (\Phi^{[t]})^H \mathbf{r}^{[t](i-1)} \right , l \right)$ $\mathbf{C}^{[t](i)} = I^{[t](i-1)} \cup \mathbf{P}^{[t](i)}$ $I^{[t]} = \max \left( \left  (\Phi_{\mathbf{C}^{[t](i)}}^{[t]})^\dagger \mathbf{y}^{[t]} \right , l \right)$ $\mathbf{r}^{[t]} = \mathbf{y} - \Phi_{I^{[t]}}^{[t]} (\Phi_{I^{[t]}}^{[t]})^\dagger \mathbf{y}^{[t]}$ <p>eğer <math>\ \mathbf{r}^{[t]}\ _2^2 \leq N\sigma^2</math> yinelemeyi sonlandır değilse eğer <math>\ \mathbf{r}^{[t]}\ _2 &gt; \ \mathbf{r}^{[t](i-1)}\ _2</math> <math>l = l + 1</math> değilse <math>I^{[t](i)} = I^{[t]}, \mathbf{r}^{[t](i)} = \mathbf{r}^{[t]}</math> <math>i = i + 1</math> eğer sonu koşul sağlandığında döngüden çık <math>I_C = I^{[t]}</math> <math>\hat{\mathbf{h}}^{[t]} = (\Phi_{I^{[t]}}^{[t]})^\dagger \mathbf{y}^{[t]}</math></p> <p>Çıktı: <math>\hat{\mathbf{h}}^{[t]}, I^{[t]}</math></p>
--

DSACS tabanlı aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi algoritmasında Çizelge 6.1.'de görüleceği gibi en başta ilk zaman dilimi için tahmin edilen aktif kullanıcı sayısı  $l = 1$  ve tahmin edilen destek kümesi  $I_C = \emptyset$  olarak kabul edilerek sezim başlatılır. Zaman dilimleri arasındaki korelasyondan dolayı bir önceki zaman dilimindeki tahmin edilen destek kümesi bir sonraki sezim için aktif kullanıcı sayısını yinelemenin başında ön tahmin için kullanılmaktadır. Burada  $|I_C|$  fonksiyonu  $I_C$  setindeki eleman sayısını, yuvarlama fonksiyonu olan  $\lceil a \rceil$  ifadesi ise  $a$ 'ya eşit veya  $a$ 'dan büyük olan en küçük tam sayıya eşitlenmektedir.

Başlangıç adımlarından sonra, her yinelemede ön destek kümesinin elemanlarını oluşturmak için artık vektörle en iyi eşleşen  $l$  tane indis seçilir. Bu ön destek kümesi;

$$P^{[t](i)} = \max\left(\left|(\Phi^{[t]})^H r^{[t](i-1)}\right|, l\right) \quad (6.11)$$

eşitliği ile oluşturulur. Burada;  $r^{[t](i-1)}$  vektörü son yinelemedeki artık vektördür. Ayrıca, eşitlikte  $\max\left(\left|(\Phi^{[t]})^H r^{[t](i-1)}\right|, l\right)$  maksimizasyon fonksiyonu ile  $(\Phi^{[t]})^H r^{[t](i-1)}$  vektörünü mutlak olarak en büyük yapan  $l$  tane indis bulunur.

Bu maksimum yapan değeri bulmamızın sebebini açıklayacak olursak; problemde amacımız genel itibariyle  $\Phi^{[t]}h^{[t]}$  ile  $y^{[t]}$  arasındaki Öklid mesafesini minimum yapan kanal kazancı vektörü olan  $h^{[t]}$ 'yi bulmaktır. Yani problemimiz aslında  $\hat{h}^{[t]} = \arg \min \|\Phi^{[t]}h^{[t]} - y^{[t]}\|_2$  olarak düşünülebilir. Ayrıca hata terimi  $\varepsilon = \min(\|h\Phi - \hat{r}\|_2)$  olarak ifade edilir. Burada;  $h^* = \frac{\Phi_I^*}{\|\Phi_I\|_2^2}$  olan bir küçültücü kullanılırsa;

$$\hat{h}^{[t]} = \arg \min \|\Phi^{[t]}h^{[t]} - y^{[t]}\|_2 \quad (6.12)$$

eşitliği şu şekilde değiştirilir:

$$\begin{aligned} \min \varepsilon &= \min(\|h\Phi - \hat{r}\|_2) \\ &= \min\left(\left\|\frac{\Phi_I^* \hat{r} \Phi}{\|\Phi\|_2^2} - \hat{r}\right\|_2^2\right) \\ &= \min\left(\|r\|_2^2 - 2\frac{(\Phi_I^* \hat{r})^2}{\|\Phi\|_2^2} + \frac{(\Phi_I^* \hat{r})^2}{\|\Phi\|_2^2}\right) \\ &= \min\left(\|r\|_2^2 - \frac{(\Phi_I^* \hat{r})^2}{\|\Phi\|_2^2}\right) \\ &= \max(\|(\Phi)^H \hat{r}\|) \end{aligned} \quad (6.13)$$

Burada görüldüğü gibi ön destek kümesini bularak aslında  $\Phi^{[t]}h^{[t]}$  ile  $y^{[t]}$  arasındaki Öklid mesafesini minimum yapan kanal kazancı vektörü olan  $h^{[t]}$ 'yi bulmaya çalışmaktayız.

Daha sonra ön destek kümesi ve son yinelemedeki tahmini destek birleştirilerek aday listesi  $C$  oluşturulur. Aday listesi ile son yinelemedeki aktif kullanıcı kümesinin hata tahmini düzeltilir. Buna literatürde geri izleme fikri olarak tanıtılmıştır (J. Xiao ve diğerleri, 2018).

$$C^{[t](i)} = I^{[t](i-1)} \cup P^{[t](i)} \quad (6.14)$$

eşitliği ile  $t$ . zaman,  $i$ . yinelemedeki aday listesi oluşturulur. Daha sonra aday listesi kullanılarak en küçük kareler yöntemi ile aday vektörü  $(\Phi_{C^{[t](i)}}^{[t]})^\dagger y^{[t]}$  oluşturulur ve mutlak değerinin en büyük  $l$  indisi alınarak  $t$ . zaman dilimindeki son destek kümesi elde edilir. Son destek kümesi;

$$I^{[t]} = \max\left(\left|(\Phi_{C^{[t](i)}}^{[t]})^\dagger y^{[t]}\right|, l\right) \quad (6.15)$$

eşitliği ile elde edilir. Daha sonra destek kümesi elde edildikten sonra algoritmanın sonlanma kriterinde kullanılan ve algoritmanın doğru sonuçlara erişip erişmediğinin kontrol edildiği artık vektör;

$$r^{[t]} = y^{[t]} - \Phi_{I^{[t]}}^{[t]} (\Phi_{I^{[t]}}^{[t]})^\dagger y^{[t]} \quad (6.16)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Eğer artık vektörün enerjisi bir önceki artık vektörün enerjisine eşit veya enerjisinden daha büyükse yeni yineleme başlar ve tahmin edilen aktif kullanıcı sayısı kademeli olarak artırılarak doğru aktif kullanıcı sayısına ulaşana kadar devam eder.

Aktif kullanıcılara ait kanal kazancı LS yöntemiyle;

$$h^{[t]} = (\Phi_{I^{[t]}}^{[t]})^\dagger y^{[t]} \quad (6.17)$$

eşitliği ile bulunmaktadır. Geliştirilen yöntemin doğru aktif kullanıcı listesine eriştiğinde yinelemenin sonlanması gerektiği için algoritmanın sonlanma kriterinin nasıl belirlendiğini açıklamak gerekirse artık vektörün enerjisi;

$$\|r^{[j]}\|_2^2 = \left( y^{[t]} - \Phi_{l^{[t]}}^{[t]} \hat{h}^{[t]} \right)^H \left( y^{[t]} - \Phi_{l^{[t]}}^{[t]} \hat{h}^{[t]} \right) \quad (6.18)$$

olarak açıklanabilir. Eğer algoritma kanal kazancını optimum olarak kestirirse  $h^{[t]}$  olarak kestirmiş olur. Algoritmanın sonlanma durumu ise bu duruma eriştiği durum olarak düşünürsek artık vektörümüz;

$$\|r^{[j]}\|_2^2 = \left( y^{[t]} - \Phi_{l^{[t]}}^{[t]} h^{[t]} \right)^H \left( y^{[t]} - \Phi_{l^{[t]}}^{[t]} h^{[t]} \right) \quad (6.19)$$

olarak değişir. Alınan pilot sinyali;

$$y^{[t]} = \Phi^{[t]} h^{[t]} + w^{[t]} \quad (6.20)$$

olduğundan  $y^{[t]}$ 'yi Eş. 6.17'de yerine yazarsak artık vektör;

$$\|r^{[j]}\|_2^2 = \|w^{[j]}\|_2^2 \quad (6.21)$$

olarak güncellenir. Dolayısıyla sonlanma kriterimiz;

$$\|r^{[j]}\|_2^2 \leq N\sigma^2 \quad (6.22)$$

olarak elde edilir. Bu kriterle eğer artık vektörün enerjisi gürültünün gücünün  $N$  ile çarpımına eşit veya daha küçükse iletilen seyrek sinyal başarılı bir şekilde yeniden oluşturulmuştur. Yani aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir diyebiliriz.

Geliştirilen yöntemde ayrıca her yinelemenin başında tahmin edilen aktif kullanıcı sayısı son yinelemede hesaplanan destek kümesinin elemanlarının sayısının üçte biri olarak hesaplanır. Önceki zaman dilimindeki korelasyon kullanılarak yineleme sayısı azaltılır, dolayısıyla karmaşıklık azaltılır. Bu özellik ile algoritma dinamik bir yapıya sahip olmaktadır. Üçte bir olarak alınan oran sistemin o an meşgul olup olmamasına göre değiştirilebilir. Yani çok fazla kullanıcının olduğu zaman dilimlerinde bu oran yükseltilebilirken az kullanıcının olduğu zaman dilimlerinde oran düşürülebilir.

#### 6.4. Performans Ölçümü

Çizelge 6.2. Benzetim çalışmaları parametreleri

Parametre	Değeri
Kayıtlı kullanıcı (potansiyel kullanıcı) ( $J$ )	36
Aktif kullanıcı ( $A$ )	6
Pilot dizisinin sayısı ( $N_P$ )	36
Kod kitabı sayısı ( $N_{CB}$ )	6
Pilot dizisinin uzunluğu ( $L$ )	23
Kanal modeli	Rayleigh

Tez kapsamında gerçekleştirilen DSACS tabanlı bu yöntemin tüm performans analizleri MATLAB programlama dili kullanılarak yapılmıştır. Yapılan benzetimlerde kullanılan parametreler Çizelge 6.2.'de verilmiştir. İletilecek sinyaller Rayleigh düz sönümlmeli kanal üzerinden iletilmiş olup gerçek performans ölçümüne yaklaşmak için Monte Carlo benzetimleri (100000 yineleme) kullanılmıştır. Tüm benzetimlerde 9 adet bitişik zaman bloğunda iletim sağlanmış bu zaman bloklarındaki sonuçların ortalamaları ile grafikler oluşturulmuştur. Sistem oluşturulurken aktif kullanıcılar homojen olarak dağıtılmıştır. Kayıtlı potansiyel kullanıcı sayısı 36 iken, aktif kullanıcı sayısı 4'ten 16'ya kadar değiştirilerek benzetimler yapılmıştır. Kayıtlı her kullanıcıya pilot dizisi gerekli olduğu için 6 kök ZC dizisi 6 dairesel kayma ile 36 ZC dizisinin olduğu ve her pilot dizisinin uzunluğunun 23 olduğu pilot havuzu oluşturulmuştur. Kullanıcılar 6 gruba ayrılmış, 6 farklı kod kitabı ve pilot dizisi kullanılarak iletim gerçekleştirilmiştir. Her bir kullanıcı pilotların yeri olarak LTE UL DMRS'yi (demodulated reference signal) kullanmıştır (Bayesteh ve diğerleri, 2014).

#### 6.5. Değerlendirme Kriteri

Aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirim yöntemlerinin performansının başarısını ölçmek için literatürde kullanılan kriterler aktif kullanıcıların ne kadar doğru sezildiğini ölçen yanlış alarm olasılığı (false alarm probability, FAP) ve kaçırılan sezim olasılığı (miss detection probability, MDP) kriterleridir. Kanal kestirimi sonucunda aktif kullanıcıların kanal kazançlarının kestiriminin başarısını ölçmek için ortalama karesel hata (mean square

error, MSE) kullanılır. Tez kapsamında geliştirilen yöntemin başarısını değerlendirmek için bu kriterler kullanılmıştır.

Geliştirilen yöntem sonucunda yöntemin performansı, kanal solması ve çevresel gürültüden dolayı bazı kullanıcılar pasif iken aktif olarak sezilebilmektedir. Yanlış sezilen kullanıcılar için yanlış alarm olasılığı  $P_{r_{FA}}$ ;

$$P_{r_{FA}} = \frac{\sum_a P_r(I^{[t]}=0|J^{[t]})}{|A^{[t]}|} \quad (6.23)$$

ile hesaplanır (Monsees, Bockelmann ve Dekorsy, 2019). Burada;  $|A^{[t]}|$   $t$ . zaman dilimindeki aktif kullanıcı sayısını ve  $J^{[t]}$  kullanıcı sayısını temsil etmektedir. Bu olasılık, aslında pasif olan fakat aktif olarak sezilen kullanıcıların oranını belirtir. Bu olasılığı düşürmek için JMPA kullanılır. JMPA'nın detayları Kaçırılan sezim olasılığı ise;

$$P_{r_{MD}} = \frac{\sum_p P_r(I^{[t]} \in A^{[t]} | J^{[t]})}{|P^{[t]}|} \quad (6.24)$$

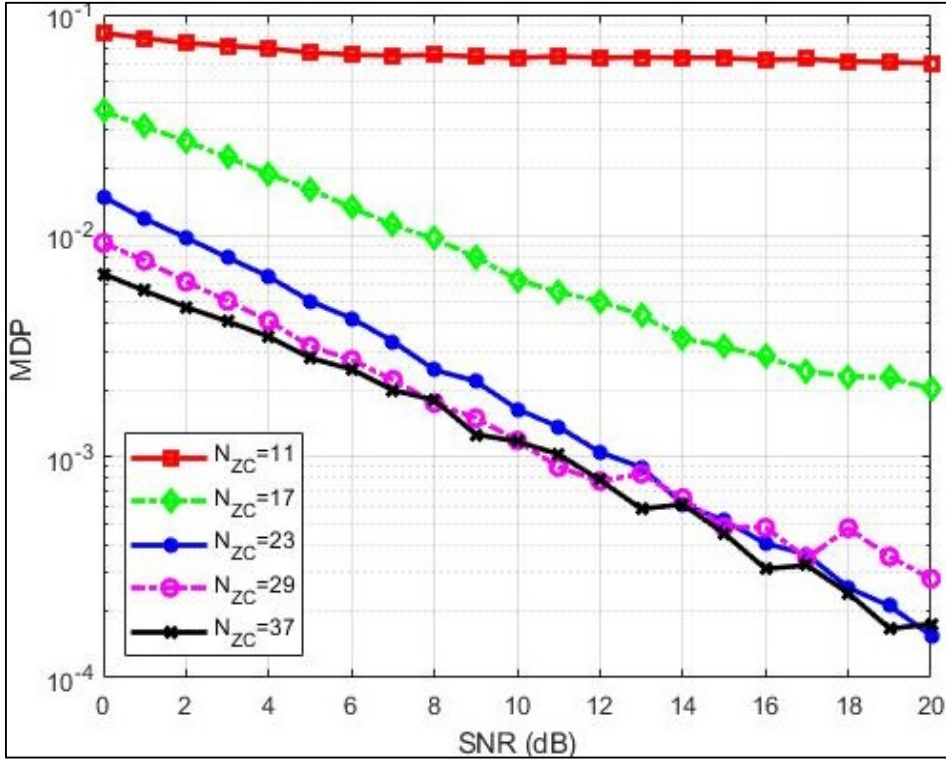
eşitliğiyle hesaplanır (Monsees ve diğerleri, 2019). Burada;  $|P^{[t]}| = |J^{[t]} - A^{[t]}|$  pasif kullanıcı sayısını,  $A^{[t]}$  ise aktif kullanıcı kümesini ifade etmektedir. Bu olasılık aslında aktif olan ve alıcıda pasif olarak algılanan kullanıcıların oranıdır. Bu olasılık aktif kullanıcı sezimi için en önemli parametredir. Bunun sebebi;  $P_{r_{FA}}$ 'nın aksine aktif olup pasif olarak sezilen kullanıcıların oranı olan  $P_{r_{MD}}$  değerini düşürmek veya telafi etmek mümkün değildir. Dolayısıyla bu değer düşük olması geliştirilen yöntemin başarısını doğrudan etkilemektedir. Kullanılan bir diğer kriter olan kanal kestiriminin ölçüldüğü ortalama karesel hata ise;

$$MSE = \frac{\|h^{[t]} - \hat{h}^{[t]}\|_2^2}{\|h^{[t]}\|_2^2} \quad (6.25)$$

olarak hesaplanır. Burada;  $h^{[t]}$   $t$ . zaman dilimindeki kanal kazancını,  $\hat{h}^{[t]}$  ise kestirilen kanal kazancını ifade etmektedir.

## 6.6. Benzetim Çalışmaları

Geliştirilen yöntemi yukarıda bahsedilen kriterlerde değerlendirmek için çeşitli benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu benzetim çalışmalarından ilki pilot sinyalinin uzunluğunun MDP'ye etkisini incelediğimiz benzetim çalışmalarıdır. Şekil 6.6.'da görüldüğü gibi pilot sinyalinin uzunluğunun  $N_{ZC} = 11$ ,  $N_{ZC} = 17$ ,  $N_{ZC} = 23$ ,  $N_{ZC} = 29$  ve  $N_{ZC} = 37$  olduğu durumlarda MDP sonuçlarının SNR'a göre değişimi görülmektedir.

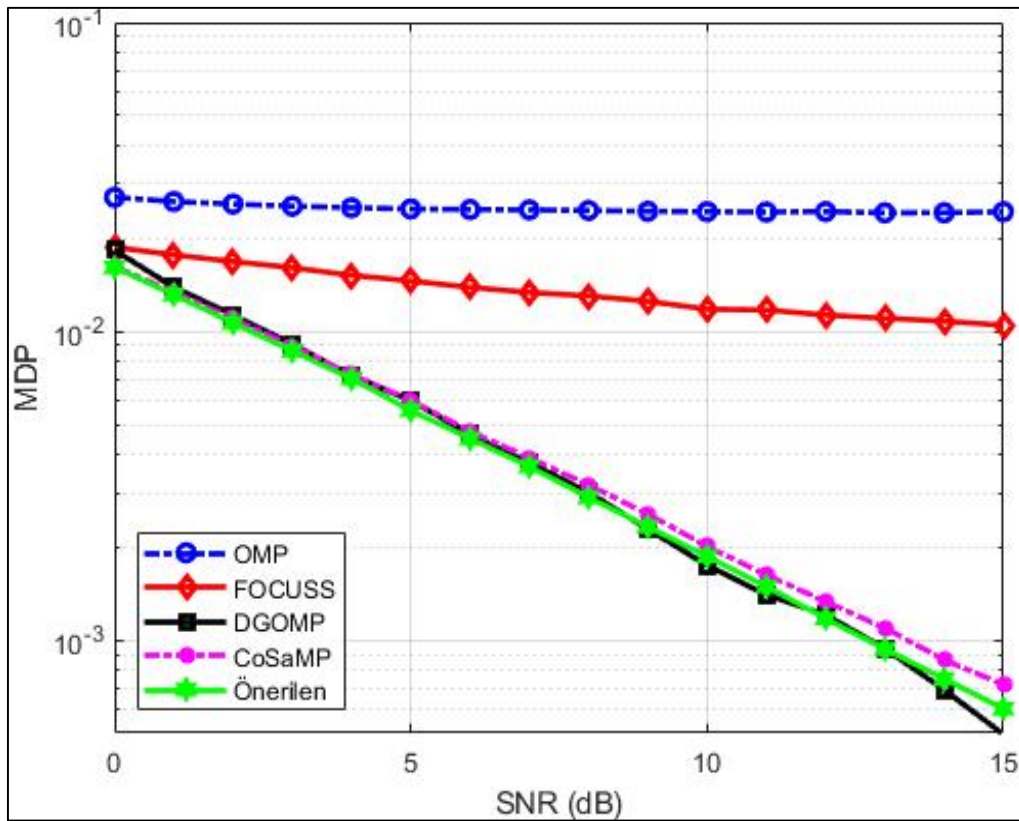


Şekil 6.6. Önerilen DSACS-tabanlı yöntemin farklı pilot uzunluklarında MDP performansı (aktif kullanıcı sayısı= 6)

Şekil 6.6.'da görüldüğü gibi pilot uzunluğunun artması MDP'yi önemli ölçüde azaltmaktadır. Fakat pilot uzunluğunun artması aynı zamanda karmaşıklığı da artırmaktadır. Bu sebeple performans-karmaşıklık arasında bir denge olması gerekmektedir. Grafiğe baktığımızda pilot uzunluğu  $N_{ZC} = 11$  ve  $N_{ZC} = 17$  olduğunda MDP değerinin oldukça yüksek olduğunu görüyoruz. Yani yöntemin performansının oldukça düşük olduğunu görüyoruz. Fakat pilot uzunluğunu arttırsak  $N_{ZC} = 23$ ,  $N_{ZC} = 29$  ve  $N_{ZC} = 37$  olduğunda MDP'nin oldukça düştüğünü görmekteyiz. Aynı zamanda bu uzunluklarda performansın birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Pilot uzunluğu arttıkça karmaşıklığın da artmasından dolayı  $N_{ZC} = 23$  uzunluğunda performans-

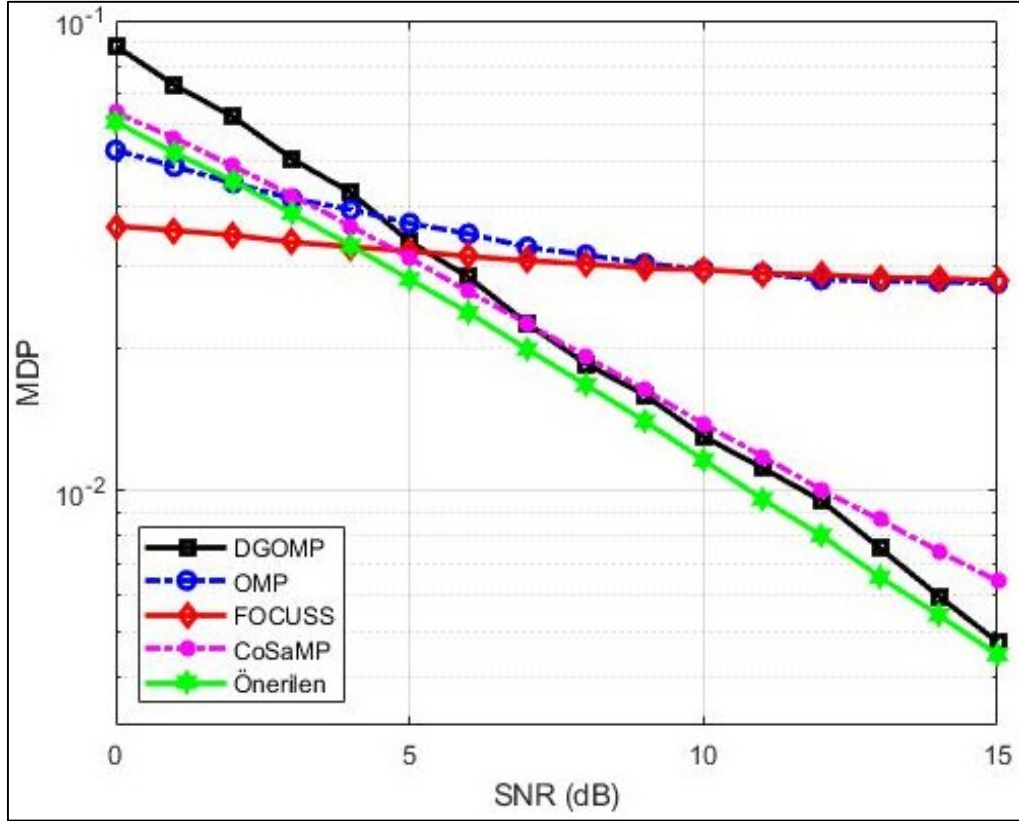
karmaşıklık dengesinin kurulduğunu söyleyebiliriz. Bu sebeple yapılan diğer tüm benzetimlerde pilot uzunluğu  $N_{zC} = 23$  olarak set edilmiştir.

Yapılan bir diğer benzetim geliştirilen yöntemin literatürde bulunan önemli yöntemlerle kıyaslanmasıdır. Bunun için literatürde bulunan ve en önemli algoritmalar olan OMP (Tropp ve Gilbert, 2007), FOCUSS (Gorodnitsky ve Rao, 1997), CoSaMP (Needell ve Tropp, 2009) ve DGOMP (Liu ve diğerleri, 2017) algoritmalarla çeşitli yönlerden karşılaştırmalar yapılmıştır.



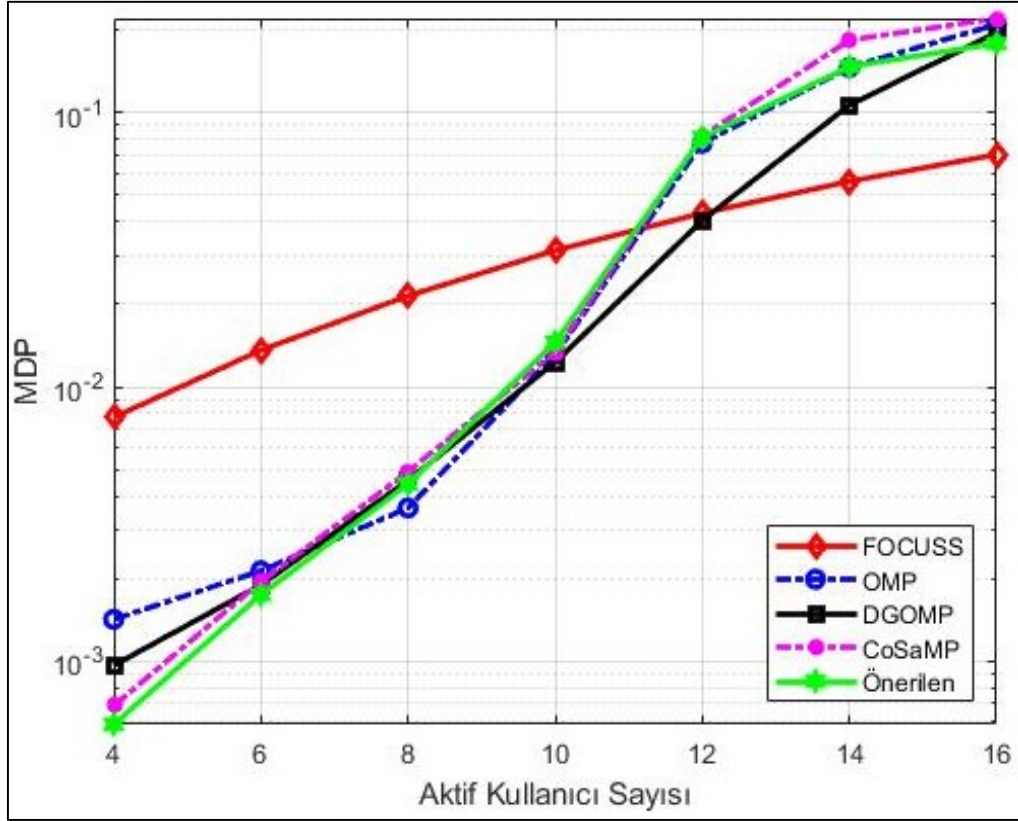
Şekil 6.7. OMP, FOCUSS, DGOMP, CoSaMP ve önerilen DSACS-tabanlı yöntemin MDP-SNR performansı (aktif kullanıcı sayısı= 6)

Şekil 6.7.'de toplam kullanıcı sayısı 36 ve aktif kullanıcı sayısı 6 iken önerilen ve diğer yöntemlerin MDP performanslarının SNR'a göre değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi geliştirilen yöntem CoSaMP ve DGOMP ile beraber en iyi performansa sahiptir. CoSaMP algoritması seyreklik ön bilgisine sahip olduğu için pratikte uygulamasının zor olması geliştirilen yöntemin diğer yöntemlerle kıyaslandığında en iyi MDP performansına sahip olduğu görülmektedir.



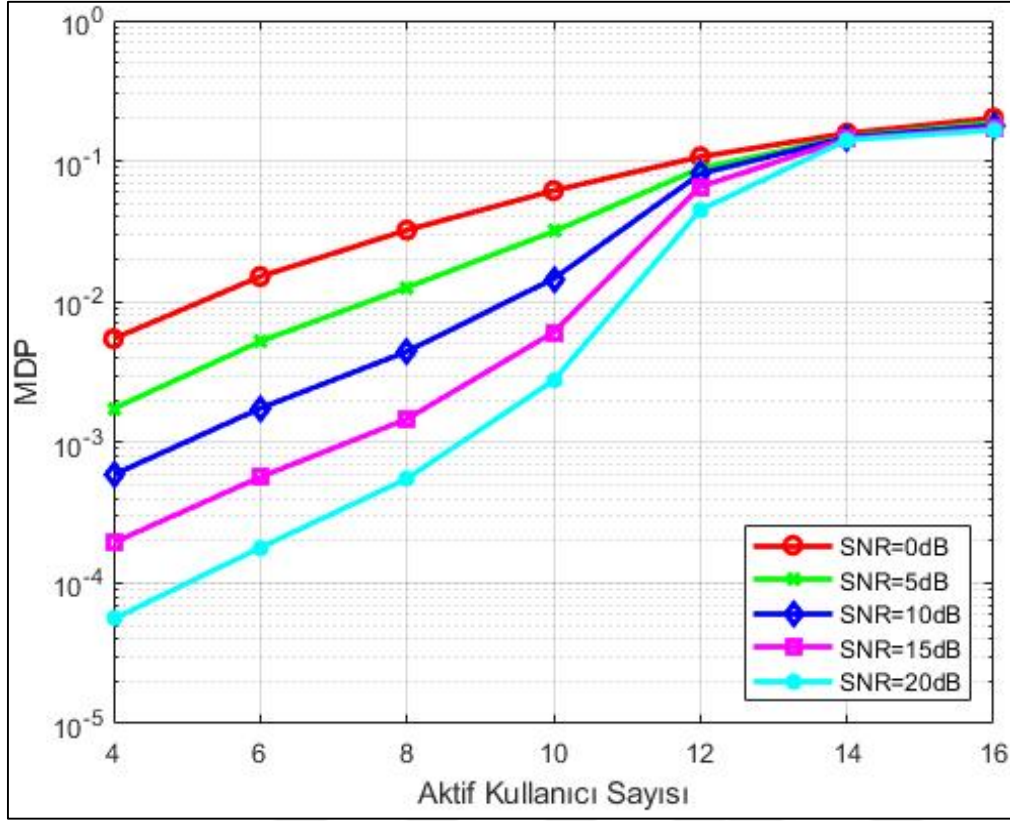
Şekil 6.8. OMP, FOCUSS, DGOMP, CoSaMP ve önerilen DSACS-tabanlı yöntemin MDP-SNR performansı (aktif kullanıcı sayısı= 10)

Şekil 6.8.'de aktif kullanıcı sayısı 10 iken önerilen ve diğer yöntemlerin MDP performanslarının SNR'a göre değişimi görülmektedir. Bir önceki grafik Şekil 6.7.'de aktif kullanıcı sayısı 6 iken seyreklik oranı daha fazla olduğu söylenebilir. Önerilen yöntem ve diğer yöntemler CS tabanlı oldukları için performanslarında genel olarak bir düşme görülmektedir. Bunun sebebi CS teorisinin seyrek sinyali yeniden oluşturma teorisi olmasından kaynaklanmaktadır. Aktif kullanıcı sayısı arttığında bu seyreklik azaldığı için tüm yöntemlerin performansları düşmüş, MDP değeri yükselmiştir. Fakat grafiğe baktığımızda SNR değerinin 4 dB değerinden sonra SNR arttıkça önerilen yöntemin en iyi performansı gösterdiği görülmektedir. Performans olarak en yakın olan diğer yöntemlerden DGOMP algoritması ile arada 1 dB'lik bir fark bulunmaktadır. Yani sistemin daha az seyrekliğe sahip olduğu durumda önerilen yöntem seyrekliğin fazla olduğu durumdaki performansından daha fazla SNR kazancı ile DGOMP'tan daha iyi bir performansa sahiptir.



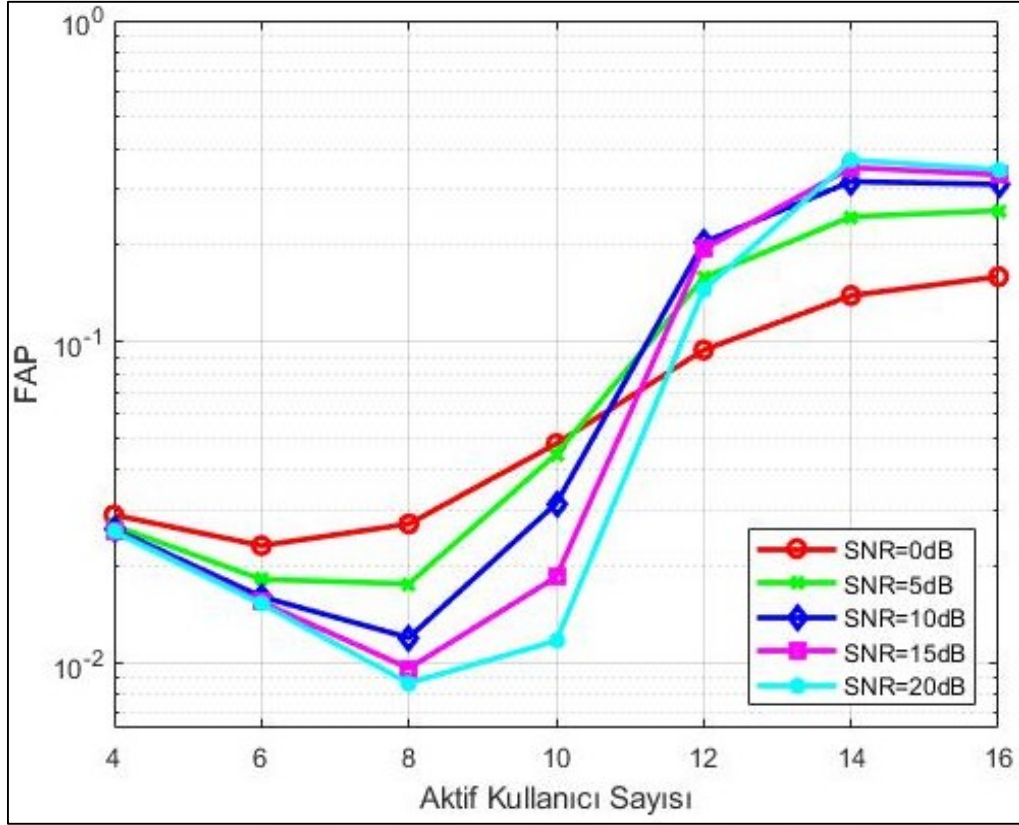
Şekil 6.9. OMP, FOCUSS, DGOMP, CoSaMP ve önerilen DSACS-tabanlı yöntemin MDP performansının aktif kullanıcı sayısına göre değişimi (SNR= 10)

Şekil 6.9.'da önerilen yöntem ve diğer yöntemlerin SNR değeri 10 olduğu durumda aktif kullanıcı sayısına göre MDP performansları kıyaslanmıştır. Toplam kullanıcı sayısının 36, aktif kullanıcı sayısının 4, 6, 8, 10, 12, 14 ve 16 olduğu durumlarda benzetimler yapılmıştır. Görüldüğü gibi aktif kullanıcı sayısının 4 ve 6 olduğu durumda önerilen yöntemin en iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. Fakat aktif kullanıcı sayısının artması ile özellikle aktif kullanıcı sayısı 10'dan sonra DGOMP algoritmasının daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. Aktif kullanıcı sayısı 12'den sonra ise FOCUSS algoritmasının daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple önerilen yöntemin aktif kullanıcı sayısının daha az olduğu sistemler olan makine tipi haberleşmesi ve tek-tük haberleşme sistemleri için yüksek başarı ile kullanılabilirliğinin olduğu söylenebilir.



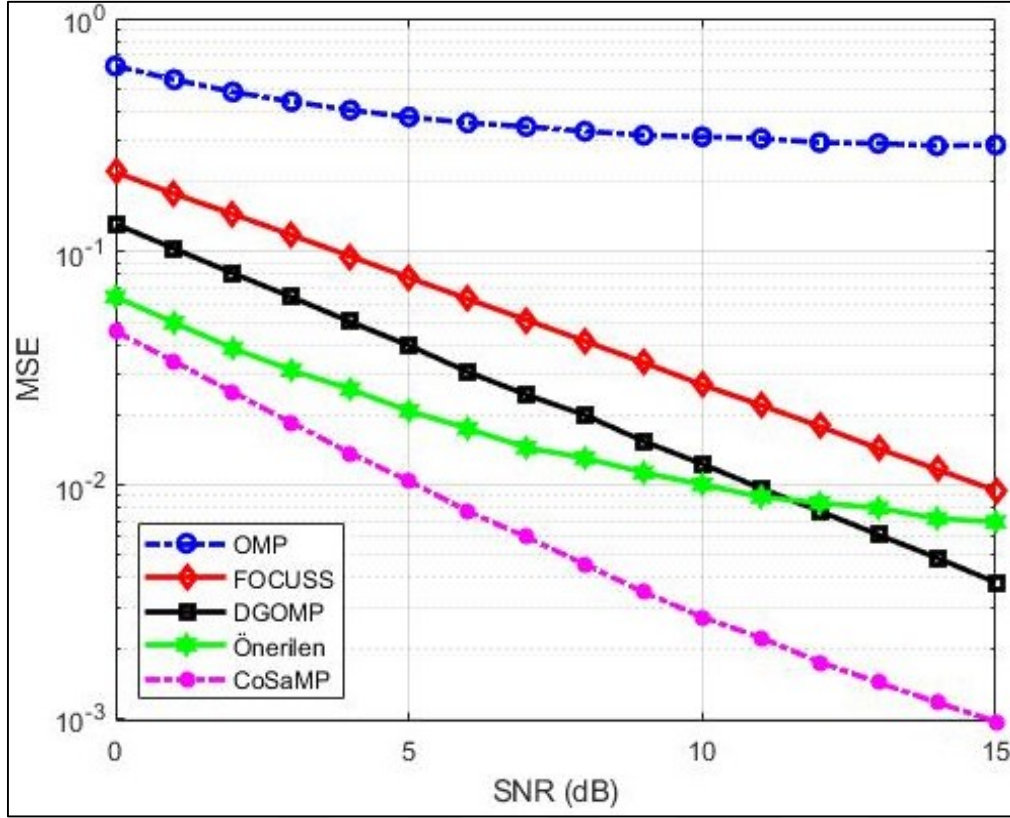
Şekil 6.10. Önerilen DSACS-tabanlı yöntemin farklı SNR’da MDP performansının aktif kullanıcı sayısına göre değişimi

Şekil 6.10’da önerilen yöntemin farklı SNR’larda aktif kullanıcı sayısına göre MDP performansı görülmektedir. SNR değerinin 0 dB, 5 dB, 10 dB, 15 dB ve 20 dB olduğu durumda önerilen yöntemin MDP değerleri kıyaslanmıştır. Yapılan bu benzetimde SNR değerinin yöntemin çalışmasına etkisi incelenmiştir. Görüldüğü gibi SNR değeri arttıkça yöntemin MDP değeri düşmektedir. Yani SNR değeri arttıkça yöntemin performans başarısı artmaktadır. Fakat aktif kullanıcı sayısı arttıkça özellikle aktif kullanıcı sayısı 10’dan sonra tüm SNR değerlerinde ortak olarak performans düşmektedir, MDP değeri yükselmektedir. Bunun sebebi yöntemin CS tabanlı olmasından kaynaklı olarak seyrekliğin azalmasıdır. Seyreklik azaldıkça CS tabanlı DSACS tabanlı aktif kullanıcı sezimi tam olarak gerçekleştirilememektedir. Bu durum genel olarak CS tabanlı tüm yöntemler için geçerlidir.



Şekil 6.11. Önerilen DSACS-tabanlı yöntemin farklı SNR’larda FAP performansının aktif kullanıcı sayısına göre değişimi

Şekil 6.11.’de önerilen yöntemin aktif kullanıcı sayısına göre değişiminin farklı SNR değerlerindeki FAP performansı görülmektedir. Görüldüğü gibi aktif kullanıcı sayısı 4 olduğu durumdan 8 olduğu duruma kadar aktif kullanıcı sayısı arttıkça FAP değeri yaklaşık düşmektedir ve önerilen yöntemin performansı artmaktadır. Fakat aktif kullanıcı sayısının 8’den fazla olduğu durumlarda FAP değeri yükselmekte ve yöntemin hata olasılığı artmaktadır. Bunun sebebi daha önceden de bahsedildiği gibi seyrekliğin azalmasıdır. Fakat burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta SNR değişiminde yöntemin performans değişimidir. Özellikle SNR değerinin 10, 15 ve 20 olduğu durumda performansların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Dolayısıyla SNR değeri arttıkça sistemin benzer performans gösterdiği görülmektedir. Geliştirilen yöntemde FAP değeri JMPA ile düzeltilmektedir. Kullanıcılar pasif iken aktif olarak yanlış sezilmiş olsa bile bu kullanıcılar JMPA ile tekrardan pasif olarak değerlendirilmektedir. Bu aşamanın yöntemin kullanılabilirliğini artırdığı söylenebilir.



Şekil 6.12. OMP, FOCUSS, DGOMP, CoSaMP ve önerilen DSACS-tabanlı yöntemin MSE-SNR performansı (aktif kullanıcı sayısı= 6)

Şekil 6.12.'de kanal kestiriminin önerilen ve diğer yöntemlerin performanslarının ölçüldüğü MSE değerlerinin SNR'a göre değişimi bulunmaktadır. Grafikten ilk olarak SNR değeri arttıkça MSE'nin azaldığını söyleyebiliriz. SNR değeri 0 dB'den 5 dB'ye arttıkça CoSaMP algoritmasının önerilen yöntemden 1 dB daha fazla kazanca sahip olduğu görülmektedir. SNR değeri arttıkça aradaki fark 7 dB'ye kadar çıkmaktadır. Bunun dışında önerilen yöntem diğer kriterlerde yakın olarak performans gösteren DGOMP algoritmasından yaklaşık olarak 3 dB kazanca sahiptir. SNR değeri 12 dB'den sonra DGOMP algoritması önerilen yöntemden daha iyi MSE performansına sahip olmaktadır. Grafikten görüleceği gibi en iyi performansa CoSaMP algoritması sahiptir fakat CoSaMP algoritması giriş olarak seyreklik ön bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Geliştirilen bu senaryoda kaba bir aktif kullanıcı listesi olarak seyreklik ön bilgisini elde etmek zor olduğu için yöntemin gerçek hayatta kullanılması pek mümkün değildir. Bu sebeple seyreklik ön bilgisine ihtiyaç duymamasıyla geliştirilen yöntem diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında oldukça iyi bir performansa sahip olduğu söylenebilir.

## 6.7. Sonuç

Yeni nesil haberleşme teknolojileri ile birlikte yeni senaryolar ortaya çıkmaktadır. Bunlardan biri olan izinsiz haberleşme sistemlerinde kullanıcılar herhangi bir istek-izin prosedürü olmadan önceden belirlenen kaynaklarla istedikleri zaman iletişim gerçekleştirebilmektedirler. İzinsiz haberleşme sistemlerinden biri olan yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA sistemleri özellikle mMTC’de kullanılması öngörülmektedir. Fakat mMTC sistemlerinde sistemi kullanan kullanıcıların yalnızca küçük bir kısmı bir zaman dilimi boyunca aktif olmaktadır. Yani sistem çok fazla kullanıcıya hizmet etmesine rağmen bir zaman diliminde aktivitenin az olmasından dolayı seyrek bir yapı söz konusudur. Bu seyreklik alıcıya gelen sinyalde gözlemlenir. Bu sebeple alıcıya gelen sinyalde hangi kullanıcıların aktif olup olmadığının tespit edilip bu kullanıcıların verilerini çözümlenmesi izinsiz sistemler için bir gerekliliktir. Ayrıca kullanıcılara tahsis edilen kaynakları kullanarak kanal durum bilgisini de kestirerek kanalın özelliklerine göre verilerin çözümlenmesi sistemin gerekliliklerindedir. Bu motivasyondan yola çıkarak tez kapsamında önerilen bu çalışmada DSACS-tabanlı aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi yöntemi önerilmiştir.

Geliştirilen DSACS-tabanlı yöntemde CS teorisinden yararlanarak yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA sistemlerde aktif kullanıcıların sezimi gerçekleştirilmiş ve daha sonra bu kullanıcıların kanal kazanç bilgisi de tahmin edilmiştir. Geliştirilen yöntem zaman blokları halinde sezim gerçekleştirir. Zamansal korelasyondan dolayı bir önceki zaman dilimindeki aktif kullanıcıları da hesaba katarak yineleme sayısını azaltmaktadır. Bunun sebebi de makine tipi haberleşmesinde bir kullanıcının bağlı zaman bloklarında aktivitesinin olmasıdır. Bu sebeple  $(t - 1)$ . zaman bloğunda aktif olan bir kullanıcının  $t$ . zaman bloğunda aktif olma ihtimali bulunmaktadır. Bu özelliği ile yöntem dinamiktir. Yöntem ayrıca uyarlamalı bir yapıya sahiptir. Seyrekliği yani kullanıcıların aktivitesini adım adım uyarlamalı olarak sezerek nihai seyrekliğe yinelemeli olarak ulaşır. Aktif kullanıcılar sezildikten sonra bu kullanıcıların kanal kazançları da LS ile kestirilmektedir. Geliştirilen yöntemde aslında pasif olan fakat aktif olarak sezilmiş kullanıcılar eğer varsa JMPA ile elimine edilerek aktif kullanıcı listesi güncellenir ve bu güncel listenin kanal kazançları tekrardan LS ile kestirilir. Daha sonrasında MPA ile kullanıcıların verileri çözümlenir.

Geliştirilen yöntemin performansını ölçmek için MDP, FAP ve MSE kriterleri ile benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu kriterlerden en önemli olanı düzeltilme ihtimalinin olmadığı MDP'dir. MDP; aslında aktif olan fakat pasif olarak sezilmiş kullanıcı oranıdır. FAP; aslında pasif olan fakat aktif olarak sezilmiş kullanıcı oranıdır. Bu oran JMPA ile telafi edilebilir. MSE ise; aktif olarak sezilen kullanıcıların kanal kestiriminin başarımını ölçmektedir. Yapılan benzetim çalışmalarına göre literatürde bulunan önemli yöntemlere göre geliştirilen yöntemin önemli bir başarısı mevcuttur. Bu başarı genel olarak kullanıcı sayısının az olduğu seyrek iletişimin olduğu sistemlerde daha yüksektir. Yöntem seyreklik önbilgisi gerektiren yöntemlerin aksine herhangi bir kaba aktif kullanıcı listesine ihtiyaç duymadığı için uygulanabilirliği daha yüksektir. Aktif kullanıcı sayısı arttıkça yöntemin performansı düşmektedir. Özellikle seyreklik oranının  $1/4$ 'ten büyük olduğu durumlarda yöntemin performansı düşmektedir. Kanal kestirimi olarak kıyaslanan yöntemlerden CoSaMP algoritmasından sonra en iyi performansa sahiptir. Fakat CoSaMP algoritması seyreklik önbilgisine ihtiyaç duyduğundan önerilen yöntem uygulanabilirliği olan yöntemler arasında en iyi kanal kestirimine de sahiptir diyebiliriz.

Genel olarak geliştirilen yöntem özellikle tek-tük haberleşmenin gerçekleştiği makine tipi haberleşmesi sistemlerinde başarıyla uygulanabilir. Pilot sinyallerin kullanıldığı yöntemin uyarlamalı ve dinamik yapısıyla aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi gerçekleştirilmektedir. Yöntem literatürde bulunan yöntemlerle kıyaslandığında başarısı yüksek ve uygulanabilirlik açısından herhangi bir kısıt bulunmamaktadır.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA sistemler için çoklu kullanıcı sezim teknikleri geliştirilmiştir. Mevcut dik çoklu erişim tekniklerinin yeni nesil haberleşme sistemlerinin getirdiği teknolojilerin gereksinimlerini yeterince karşılamamasından kaynaklı olarak çeşitli dik olmayan çoklu erişim teknikleri önerilmiştir. Bu tekniklerden SCMA verici ve alıcı yapısıyla çok fazla kullanıcının olduğu mMTC için uygun olduğu ve yakın zamanda uygulamalarda kullanılmasının muhtemel olduğu bir aday çoklu erişim tekniğidir. Geleneksel istek-izin prosedürünün olduğu iletişim sistemleri gecikmeye sebep olduğu için kullanıcıların kendilerine tahsis edilmiş kaynaklarla izinsiz haberleşme sistemleri bu yeni çoklu erişim teknikleri ile kullanılması planlanmaktadır. Fakat özellikle izinsiz SCMA sistemlerinde sistemin hizmet ettiği kullanıcı sayısı arttıkça alıcının karmaşıklığı artmaktadır. Bu sebeple alıcı tarafta karmaşıklığı azaltmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca mMTC’de bir zaman diliminde tüm kullanıcıların yalnızca küçük bir kısmı aktif olarak iletişim sağlamaktadır. Bunun için aynı zamanda aktif kullanıcıların da sezilmesi gerekmektedir. Bahsedilen bu gereksinimlerden kaynaklı olarak tez kapsamında SCMA’nın alıcı karmaşıklığını azaltmaya yönelik bir çoklu erişim tekniği önerilmiştir. Makine tipi haberleşmesindeki kullanıcı aktivite oranının düşük olmasından dolayı da tez kapsamında aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi yöntemi önerilmiştir.

CS teorisi seyrek bir sinyali daha az ölçüm ile yeniden oluşturulabileceğini ileri süren bir teoridir. Seyreklik; bir sinyal için sahip olduğu bilgi hızının Nyquist hızından daha az örnekle yeniden oluşturulabilmesinin bir ölçüsüdür. Bu teoriyi kullanarak haberleşme sistemlerinde özellikle seyrekliğin söz konusu olduğu durumlarda çeşitli işlemler yapılmaktadır. Tez kapsamında CS teorisini kullanarak 2 adet yenilikçi yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan ilki CS-tabanlı çoklu kullanıcı sezimi, diğeri CS-tabanlı aktif kullanıcı sezimi ve kanal kestirimi yöntemidir.

Geliştirilen ilk yöntemde MPA’nın karmaşıklığını azaltmak için 2 aşamalı bir yöntem geliştirilmiştir. İlk aşamada birkaç yineleme ile birincil sezim yapılmıştır. MPA sonucunda seyrek bir hata vektörü oluşturulmuştur. Daha sonra CS-tabanlı COSAMP algoritması kullanılarak seyrek hata doğrulama işlemi yapılmıştır.

Geliştirilen bu yöntem daha az yineleme ile orijinal MPA'ya göre daha yüksek başarıma sahiptir. Önerilen yöntem benzer performansa daha az yineleme ile ulaşmaktadır. Bu sebeple orijinal MPA'ya göre daha az karmaşıklığa sahiptir. Aynı yineleme sayısında orijinal MPA'ya ve önerilen yönteme bakıldığında düşük SNR değerlerinde benzer performans göstermektedir. Ancak yüksek SNR değerlerinde önerilen yöntemin orijinal MPA'ya göre daha fazla kazancı bulunmaktadır. Fakat bu kazanımlarının yanında seyreklik önbilgisine ihtiyaç duyması yöntemin en önemli dezavantajıdır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için MPA'nın yineleme sayısına göre hata vektörünün seyrekliği fazla olduğu için yapılan benzetimlerde seyreklik oranı algoritmanın başında yinelemeli olarak artırılarak performansın yüksek olduğu seyreklikte seyrek hata doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen özellikleriyle bu yöntem özellikle kullanıcı sayısının çok fazla olduğu yukarı yönlü bağlantılı makine tipi haberleşmesinde SCMA sistemlerde MPA'nın kullanıcı sayısı arttıkça artan karmaşıklığını azaltmak için kullanılabilir.

Geliştirilen ilk yöntem için yapılan benzetim çalışmalarına baktığımız zaman tez kapsamında önerilen yöntem orijinal MPA'ya göre yaklaşık olarak 2 dB'lik kazanç sağlamaktadır. Yöntemin karmaşıklığına baktığımız zaman ise aynı performansa %22 daha az karmaşıklık ile ulaşılabilir. Geliştirilen yöntem orijinal MPA'nın yineleme sayısını 5 yineleme azaltarak aynı SER performansına sahip olabilmektedir.

Geliştirilen ikinci yöntemde CS-tabanlı yukarı yönlü bağlantılı izinsiz SCMA sistemlerde aktif kullanıcıların sezimi gerçekleştirilmiş ve daha sonra bu kullanıcıların kanal kazanç bilgisi de tahmin edilmiştir. Zamansal korelasyondan dolayı zaman dilimleri arasındaki aktiviteyi hesaba katarak yineleme sayısı azaltılmıştır. Bunun sebebi de makine tipi haberleşmesinde bir kullanıcının bağlı zaman bloklarında aktivitesinin olmasıdır. Bu sebeple belirli zaman dilimlerinde aktivitenin çok fazla değişmeme ihtimali bulunmaktadır. Bu özelliği ile yöntemin dinamik bir yapıya sahiptir. Yöntem ayrıca uyarlamalı bir yapıya sahiptir. Seyrekliği uyarlamalı olarak sezerek nihai seyrekliğe yinelemeli olarak ulaşır. AKS'den sonra bu kullanıcıların kanal kazançları da LS ile kestirilmektedir. Geliştirilen yöntemde aslında pasif olan fakat aktif olarak sezilmiş kullanıcılar eğer varsa JMPA ile elimine edilerek geri besleme ile aktif kullanıcı listesi güncellenir ve bu güncel listenin kanal kazançları tekrardan LS ile kestirilir. Bu işlemler sonrasında sadece aktif kullanıcıların verileri çözümlenir.

Geliştirilen ikinci yöntem için yapılan benzetim çalışmalarına bakıldığında önerilen yöntemin genel olarak seyrekliğin yüksek olduğu durumlarda performansının iyi olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle en önemli kriter olan MDP performansı olarak literatürdeki kıyaslanan yöntemlere göre en iyi performansa sahiptir. Yöntem yapılan benzetim çalışmalarında toplam kullanıcının 36 olarak belirlendiği bir sistem için aktif kullanıcının 10 kullanıcıdan daha fazla olması halinde performansı düşmektedir. Yani seyreklik oranının yaklaşık olarak  $\frac{1}{4}$ 'e kadar iyi bir performansa sahip olduğu, bu değerden sonra performansının düştüğü söylenebilir. Geliştirilen yöntem FAP değerinin JMPA ile telafi edilmesi açısından oldukça başarılıdır. MSE kriterinde CS-tabanlı CoSaMP algoritmasının en iyi kanal kestirimi performansına sahip olmasına rağmen CoSaMP algoritmasının seyreklik ön bilgisi istemesi uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple seyreklik bilgisine ihtiyaç duymaması ile geliştirilen yöntem bu kriterde de oldukça iyi performansa sahip olduğu söylenebilir. Yöntemin sıkıştırılmış algılama tabanlı yapısından dolayı seyrekliğin azaldığı yani aktif kullanıcı sayısının artması durumunda performansı düşmektedir. Yani geliştirilen yöntem yoğun aktif kullanıcı sistemler için çok uygun bir yöntem değildir. Bu geliştirilen yöntemin dezavantajlarındandır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda yeni çalışmalara yol açması açısından ileriye dönük birkaç uygulama yapılabilir. Pilot dizisi özellikle izinsiz haberleşme sistemleri açısından önemi çok yüksek olan bir konudur. Pilot dizileri yöntemin başarı performansını doğrudan etkileyebilmekte olup aynı zamanda karmaşıklığı da oldukça artırabilir. Bu sebeple bu konuda farklı pilot dizileri veya farklı pilot uzunlukları ile yeni yöntemler geliştirilebilir. Pilot uzunluğunun uyarlamalı olarak değiştirildiği yöntem de yine yenilikçi bir düşünce olabilir. Ayrıca geliştirilen yöntem sadece SCMA'da sınırlı kalmayıp diğer NOMA tekniklerinde de temel yapı aynı kalacak şekilde uygulanabilir. Veya SCMA'nın yeni varyantları olan mesela MC-SCMA (Abebe ve Kang, 2019) gibi yöntemlerde de uygulanabilir.



## KAYNAKLAR

- Abebe, A. T. and Kang, C. G. (2019). Grant-Free Uplink Transmission with Multi-Codebook-Based Sparse Code Multiple Access (MC-SCMA). *IEEE Access*, 7, 169853–169864.
- Au, K., Zhang, L., Nikopour, H., Yi, E., Bayesteh, A., Vilaipornsawai, U. and Zhu, P. (2014). *Uplink contention based SCMA for 5G radio access*. 2014 IEEE Globecom Workshops (GC Workshops 2014), Austin, USA, 900–905.
- Bao, J., Ma, Z., Xiao, M., Ding, Z. and Zhu, Z. (2018). Performance Analysis of Uplink SCMA with Receiver Diversity and Randomly Deployed Users. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(3), 2792–2797.
- Bao, J., Ma, Z., Xiao, M., Tsiftsis, T. A. and Zhu, Z. (2018). Bit-interleaved coded SCMA with iterative multiuser detection: Multidimensional constellations design. *IEEE Transactions on Communications*, 66(11), 5292–5304.
- Bayesteh, A., Yi, E., Nikopour, H. and Baligh, H. (2014). *Blind detection of SCMA for uplink grant-free multiple-access*. IEEE 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS), Barcelona, Spain, 853–857.
- Bukar, I. (2017). *Spectrally efficient Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) techniques for future generation mobile systems*, Doctoral dissertation, University of Sussex, United Kingdom.
- Candès, E. J., Romberg, J. K. and Tao, T. (2006). Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 59(8), 1207–1223.
- Candès, E. J. and Tao, T. (2006). Near-optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies?, *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(12), 5406–5425.
- Candès, E. and Tao, T. (2005). Decoding by Linear Programming. *IEEE Transactions on Information Theory*, 51(12), 4203–4215.
- Chen, S., Ren, B., Gao, Q., Kang, S., Sun, S. and Niu, K. (2017). Pattern division multiple access—a novel nonorthogonal multiple access for fifth-generation radio networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(4), 3185–3196.
- Chen, Z., Ding, Z., Dai, X. and Zhang, R. (2017). An Optimization Perspective of the Superiority of NOMA Compared to Conventional OMA. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 65(19), 5191–5202.
- Dai, J., Chen, G., Niu, K. and Lin, J. (2018). Partially active message passing receiver for MIMO-SCMA systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(2), 222–225.

- Dai, L., Wang, B., Ding, Z., Wang, Z., Chen, S. and Hanzo, L. (2018). A survey of non-orthogonal multiple access for 5G. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(3), 2294–2323.
- Dai, L., Wang, B., Yuan, Y., Han, S., I, C. L. and Wang, Z. (2015). Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends. *IEEE Communications Magazine*, 53(9), 74–81.
- Dai, W. and Milenkovic, O. (2009). Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction. *IEEE Transactions on Information Theory*, 55(5), 2230–2249.
- Deng, Y., Wang, X., and Wang, J. (2016, June). *Compressive sensing based signal design for multiple access in return channel*. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Nara, Japan, 1-4.
- Donoho, D. L. (2006). Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(4), 1289–1306.
- Du, Y., Cheng, C., Dong, B., Chen, Z., Wang, X., Fang, J. and Li, S. (2018). Block-Sparsity-Based Multiuser Detection for Uplink Grant-Free NOMA. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(12), 7894–7899.
- Du, Y., Dong, B., Chen, Z., Fang, J. and Wang, X. (2016). A Fast Convergence Multiuser Detection Scheme for Uplink SCMA Systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 5(4), 388–391.
- Du, Y., Dong, B., Chen, Z., Fang, J. and Yang, L. (2016). Shuffled Multiuser Detection Schemes for Uplink Sparse Code Multiple Access Systems. *IEEE Communications Letters*, 20(6), 1231–1234.
- Du, Y., Dong, B., Chen, Z., Wang, X. and Gao, P. (2017). Improved Serial Scheduling-Based Detection for Sparse Code Multiple Access Systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 6(5), 570–573.
- Durak, M. H. and Ertug, O. (2019a). *Compressed Sensing Based Multiuser Detection for Sparse Code Multiple Access*. 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Sivas, Turkey, 1–4.
- Durak, M. H. and Ertug, O. (2019b). *CS-based multiuser detector for SCMA systems*. 2019 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), Istanbul, Turkey, 3–6.
- Durak, M. H. and Ertug, O. (in press). Dynamic and Sparsity Adaptive Compressed Sensing Based Active User Detection and Channel Estimation of Uplink Grant-Free SCMA. *Radioengineering*.
- Ericson. (2015). On The Pulse of Network Society, *Ericson Mobility Report*. Stockholm, Sweden. 3–28.

- Gao, P., Du, Y., Dong, B., Zhu, W., Chen, Z. and Wang, X. (2018). Low-Complexity CS-Aided MPA Detector for SCMA Systems. *IEEE Communications Letters*, 22(4), 784–787.
- Gorodnitsky, I. F. and Rao, B. D. (1997). Sparse signal reconstruction from limited data using FOCUSS: A re-weighted minimum norm algorithm. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 45(3), 600–616.
- Guo, S., Wu, W., Wu, X., Chen, X. and Zhang, T. (2019). *Dynamic pilot design and channel estimation based on structured compressive sensing for uplink SCMA system*. 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications Workshops in China (ICCC Workshops), Changchun, China, 87–92.
- Han, K., Hu, J., Chen, J. and Lu, H. (2018). A Low Complexity Sparse Code Multiple Access Detector Based on Stochastic Computing. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 65(2), 769–782.
- He, Q., Bai, B., Feng, D., Xu, H. and Zhu, M. (2018). *A nonbinary LDPC-coded SCMA system with optimized codebook design*. IEEE Vehicular Technology Conference, Chicago, USA, 1–6.
- Herrity, K. K., Gilbert, A. C. and Tropp, J. A. (2006). *Sparse Approximation Via Iterative Thresholding*. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings, Toulouse, France, 624–627.
- Hoshyar, R., Wathan, F. P. and Tafazolli, R. (2008). Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 56(4), 1616–1626.
- Huang, H., Zhao, H., Wang, F. and Li, J. (2019). *Uplink Grant-free Multi-codebook SCMA Based on High-overload Codebook Grouping*. IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops), Beijing, China, 112–116.
- Huang, Y., Li, Y., Zhao, M., Xu, X. and Wang, J. (2018). *Two simplified multiuser detection algorithms for uplink SCMA systems via generalized approximate message passing*. IEEE Vehicular Technology Conference, Chicago, USA, 1–5.
- Kim, H., Lim, Y.-G., Chae, C.-B. and Hong, D. (2017). Multiple Access for 5G New Radio: Categorization, Evaluation, and Challenges, *arXiv preprint arXiv:1703.09042*.
- Kim, J., Lee, K., Kim, J., Wang, H., Na, M. and Hong, D. (2017). A novel SCMA system for coexistence of active users and inactive users. *IEEE Communications Letters*, 21(12), 2730–2733.
- Kiracı, F. (2020). *SCMA codebook design approaches*. Yüksek Lisans Tezi, Kadir Has Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Liu, J., Wu, G., Li, S. and Tirkkonen, O. (2017). *Blind detection of uplink grant-free SCMA with unknown user sparsity*, IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, 1–6.

- Long, Y., Chen, Z., Guo, Z. and Fang, J. (2016). A Novel HARQ Scheme for SCMA Systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 5(5), 452–455.
- Ma, X., Yang, L., Chen, Z. and Siu, Y. (2017). Low complexity detection based on dynamic factor graph for SCMA systems. *IEEE Communications Letters*, 21(12), 2666–2669.
- Monsees, F., Bockelmann, C. and Dekorsy, A. (2015). *Compressed sensing Neyman-Pearson based activity detection for sparse multiuser communications*. 10th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding, Hamburg, Germany, 1-6.
- Needell, D. and Tropp, J. A. (2009). CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 26(3), 301–321.
- Nikopour, H. and Baligh, H. (2013). *Sparse code multiple access*. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, UK, 332–336.
- Pati, Y. C., Rezaifar, R. and Krishnaprasad, P. S. (1993). *Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition*. Proceedings of 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 40–44.
- Ping, L., Liu, L., Wu, K. Y. and Leung, W. K. (2004). *On interleave-division multiple-access*. IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, 2869–2873.
- Sergienko, A. B. and Klimentyev, V. P. (2017). *Spectral efficiency of uplink SCMA system with CSI estimation*. Conference of Open Innovation Association (FRUCT), Helsinki, Finland, 391–397.
- Shahab, M. B., Abbas, R., Shirvanimoghaddam, M. and Johnson, S. J. (2020). Grant-Free Non-Orthogonal Multiple Access for IoT: A Survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(3), 1805–1838.
- Silva, B. F. da. (2019). *Strategies for Multistage Design of Sparse Code Multiple Access Systems*. Universidade Federal De Santa Catarina, Santa Catarina, Brazil.
- Struminsky, K., Kruglik, S., Vetrov, D. and Oseledets, I. (2016). *A new approach for sparse Bayesian channel estimation in SCMA uplink systems*. 2016 8th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Yangzhou, China, 1-5.
- Taherzadeh, M., Nikopour, H., Bayesteh, A. and Baligh, H. (2014). *SCMA codebook design*. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-2014), Vancouver, BC, Canada, 1-5.

- Tan, J., Ding, W., Yang, F., Pan, C. and Song, J. (2016). *Compressive sensing based time-frequency joint non-orthogonal multiple access*. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Nara, Japan, 1-4.
- Targarona, E. L. (2010). *Sparse Channel Estimation based on Compressed Sensing Theory for UWB systems*, Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.
- Tibshirani, R. (1996). Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 58(1), 267–288.
- Tropp, J. A. and Gilbert, A. C. (2007). Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit. *IEEE Transactions on Information Theory*, 53(12), 4655–4666.
- Vaezi, M., Ding, Z. and Vincent Poor, H. (2018). *Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond. Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*. Switzerland, Springer International Publishing, 549.
- Wang, B., Dai, L., Mir, T. and Wang, Z. (2016). Joint User Activity and Data Detection Based on Structured Compressive Sensing for NOMA. *IEEE Communications Letters*, 20(7), 1473–1476.
- Wang, B., Dai, L., Yuan, Y. and Wang, Z. (2016). *Compressive sensing based multi-user detection for uplink grant-free non-orthogonal multiple access*. 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2015), Boston, USA, 1–5.
- Wang, B., Dai, L., Zhang, Y., Mir, T. and Li, J. (2016). Dynamic Compressive Sensing-Based Multi-User Detection for Uplink Grant-Free NOMA. *IEEE Communications Letters*, 20(11), 2320–2323.
- Wang, B., Wang, K., Lu, Z., Xie, T. and Quan, J. (2015). *Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5G*. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Ghent, Belgium, 1-5.
- Wang, F., Zhang, Y., Zhao, H., Huang, H. and Li, J. (2018). *Active user detection of uplink grant-free SCMA in frequency selective channel*. IEEE Vehicular Technology Conference, Chicago, USA, 1–6.
- Wang, Y., Zhang, X., Zhou, S., Lian, J. and Xiao, L. (2016). *User detection and channel estimation for SCMA uplink system in dispersive channel*. IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), Shenzhen, China, 1-5.
- Wang, Y., Zhou, S., Xiao, L., Zhang, X. and Lian, J. (2015). *Sparse Bayesian learning based user detection and channel estimation for SCMA uplink systems*. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Nanjing, China, 1-5.
- Wei, F. and Chen, W. (2017). *Message Passing Receiver Design for Uplink Grant-Free SCMA*. IEEE Globecom Workshops (GC Workshops 2017), Singapore, 1-6.

- Wei, F., Chen, W., Wu, Y., Ma, J. and Tsiftsis, T. A. (2019). Message-Passing Receiver Design for Joint Channel Estimation and Data Decoding in Uplink Grant-Free SCMA Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*.
- Wu, H., Ping, L. and Perotti, A. (2006). User-specific chip-level interleaver design for IDMA systems. *Electronics Letters*, 42(4), 233.
- Wu, Y., Zhang, S. and Chen, Y. (2015). *Iterative multiuser receiver in sparse code multiple access systems*. IEEE International Conference on Communications, London, UK, 2918–2923.
- Xiao, B., Xiao, K., Zhang, S., Chen, Z., Xia, B. and Liu, H. (2015). *Iterative detection and decoding for SCMA systems with LDPC codes*. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP 2015), Nanjing, China, 1-5.
- Xiao, J., Deng, G., Nie, G., Tian, H. and Jin, J. (2018). *Dynamic Adaptive Compressive Sensing-Based Multi-User Detection in Uplink URLLC*. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Bologna, Italy, 1-6.
- Xiao, K., Xiao, B., Chen, Z., Xia, B., Chen, D. and Ma, S. (2016). *Convergence analysis for multiuser detection in sparse code multiple access systems*. 2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps 2016), Washington, DC, USA, 1-6.
- Xiao, K., Xiao, B., Zhang, S., Chen, Z. and Xia, B. (2015). *Simplified multiuser detection for SCMA with sum-product algorithm*. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Nanjing, China, 1-5.
- Yang, L., Ma, X. and Siu, Y. (2017). Low Complexity MPA Detector Based on Sphere Decoding for SCMA. *IEEE Communications Letters*, 21(8), 1855–1858.
- Yuan, Z., Yu, G., Li, W., Yuan, Y., Wang, X. and Xu, J. (2016). *Multi-user shared access for internet of things*. IEEE Vehicular Technology Conference, Nanjing, China, 1–5.
- Yuya Saito, Yoshihisa Kishiyama, Anass Benjebbour, Takehiro Nakamura, Anxin Li, and K. H. (2013). *Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access*. IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Dresden, Germany, 1-5.



*GAZİ GELECEKTİR..*