

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NOMA TABANLI ÇOKLU ERİŞİMDE KULLANICI ÇİZELGELEME VE YOL  
ATAMA TEKNİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ezgi METE**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tolga GİRİCİ**

**Haziran 2023**



## ÖZET

Doktora Tezi

### NOMA TABANLI ÇOKLU ERİŞİMDE KULLANICI ÇİZELGELEME VE YOL ATAMA TEKNİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ezgi METE

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Tolga GİRİCİ

Tarih: Haziran 2023

Kablosuz haberleşmede, ağlarda kullanıcı düğümlerin birbirlerine iletim yapabilmelerini, belirli sürede çok sayıda paketin iletilmesini sağlayacak yöntemlerin geliştirilmesi incelenmiştir. Dik Olmayan Çoklu Erişim (NOMA) ve Ardışık Girişim Çıkarımı (SIC) ağlarda kullanımına yeni bir makine öğrenmesi yöntemi olan Q-öğrenmenin dahil edilmesi ile kullanıcılar arasındaki iletişimin verimliliğinin analizi yapılmıştır. Sonuçlara göre, Q-öğrenmenin kullanıldığı yöntem en çok paket sayısını iletmeyi başarmıştır. Kablosuz ağlarda sistem çıktısı optimizasyonu için çizelgeleme ve çok-yollu yönlendirme çalışılmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, modelimiz, iletilen düğümlerin güç alanında Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access- NOMA) ile çoklama yapmakta ve de alıcılarda Ardışık Girişim Çıkarımı (Successive Interference Cancellation- SIC) kullanarak iletimlerin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Düğümlerin iletim güçlerinin sabit olduğu varsayılmıştır. NOMA (bir iletilen ve iki alıcı) ya da SIC (iki iletilen ve bir alıcı) uygulayabilen üç düğümlü birleşik bağlara ek olarak tek bağlar (bir iletilen ve bir alıcı) oluşturulmuştur. Bağlar, uçtan uca akış hızlarının ağırlıklı toplamının optimizasyonu için zamanda çakışmayacak şekilde çizelgelenmiştir. Başarımdaki gelişme, NOMA ve SIC eklenerek test edilmiştir. Sayısal sonuçlar, NOMA ve SIC ile ağırlıklı toplam hızda neredeyse eşit ve belirgin iyileşme (25-30%) olduğunu göstermektedir. Tüm

akışların kaynağının aynı olduğu bir durum incelenmiştir. Bu durumda, NOMA'nın kullanılması 65-70% iyileşme sağlamış, SIC'nin kullanılması etkisiz olmuştur. Son olarak, Ardışık Girişim Çıkarımı (Successive Interference Cancellation- SIC) tabanlı dağıtık kablosuz tasarsız bir ağda birleşik optimal yönlendirme ve en kısa sürede çizelgeleme çalışılmıştır. En iyi çözüm, SIC kullanılan bir ağda, verilen bir akış hızında, çizelgeleme için gereken en az zaman dilimi sayısını bulmaktadır. SIC kullanan optimal çözümün performansı, girişimin gürültü olarak kullanıldığı durumla karşılaştırılmaktadır. Sonuçlara göre, SIC kullanan optimal çözüm, SIC kullanmayan optimal çözümün performansına kıyasla daha belirgin bir iyileşme göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** NOMA, SIC, Q-öğrenme, Kablosuz haberleşme, İletim planlama



## **ABSTRACT**

Doctor of Philosophy

### **ROUTING AND SCHEDULING TECHNIQUES IN NOMA-BASED MULTIPLE ACCESS**

Ezgi METE

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Tolga GİRİCİ

Date: June 2023

In wireless communications, user nodes in networks require techniques to transfer a high load of packets to each other in a limited time frame. Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) and Successive Interference Cancellation (SIC) are such techniques. In addition to that, Q-learning is a new method of machine learning that can be used to analyze the success communication planning and transfer of packets. According to the simulation results, integrating Q-learning has increased the number of transferred packets the most. Scheduling and multi-path routing for system output optimization has been studied for wireless networks. According to the literature reviews, our model differs from others by applying NOMA (Non-orthogonal Multiple Access) at the transmitters and SIC (Successive Interference Cancellation) at the receivers. We assume that the transmission powers are constant. NOMA (one transmitter, two receivers), SIC (two transmitters, one receiver) and single links (one transmitter and one receiver) are formed. Links have been scheduled to optimize the weighted sum of end to end flow rate. The improvement in performance has been tested by the integration of NOMA and SIC to the system. Numerical results show that NOMA and SIC improves the system weighted sum rate by 25-30%. A case where the source of all flows is the same has been investigated. In this scenario, NOMA has provided 65-70% improvement in performance whereas SIC has shown no effect on the

performance. In a distributed ad hoc network where SIC is integrated, joint optimal routing and minimum length scheduling is studied. Optimal solution finds minimum amount of time slots required to schedule transmissions at a given flow rate in an SIC network. The performance of the optimal solution with SIC is compared to the one without SIC. According to the results, the optimal solution using SIC shows a significant improvement compared to the one that does not use SIC.

**Keywords:** NOMA, SIC, Q-learning, Wireless communication, Scheduling



## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr Tolga Girici'ye, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.







## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>ix</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>xi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Literatür Araştırması.....	1
<b>2.Q-ÖĞRENME VE SIC TABANLI ÇİZELGELEME</b> .....	<b>9</b>
2.1 Giriş.....	9
2.2 Sistem Modeli.....	9
2.2.1 SIC tabanlı iletim.....	10
2.2.2 Girişimin gürültü kabul edildiği iletim.....	11
2.3 Optimal Çözüm.....	11
2.4 Algoritma.....	14
2.4.1 SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme.....	18
2.4.2 SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme.....	18
2.5 Benzetimler.....	19
<b>3. ARDIŞIK GİRİŞİM İPTALİ KULLANAN KABLOSUZ TASARSIZ AĞLARDA BİRLEŞİK OPTİMAL YÖNLENDİRME VE MİNİMUM UZUNLUK ÇİZELGELEME</b> .....	<b>23</b>
3.1 Giriş.....	23
3.2 Sistem Modeli.....	23
3.2.1 SIC tabanlı iletim.....	24
3.2.2 Girişimin gürültü kabul edildiği iletim.....	25
3.3 Problem Formülasyonu.....	25
3.4 Benzetim Sonuçları.....	27
<b>4. DİK OLMAYAN ÇOKLU ERİŞİM TABANLI KABLOSUZ AĞLARDA BİRLEŞİK YÖNLENDİRME VE ÇİZELGELEME</b> .....	<b>31</b>
4.1 Giriş.....	31
4.2 Sistem Modeli.....	32
4.2.1 SIC tabanlı iletim.....	32
4.2.2 NOMA tabanlı iletim.....	33
4.2.3 Birleşik bağlar.....	34
4.2.4 Çelişkiler.....	34
4.3 Problem Formülasyonu.....	35
4.4 Benzetimler.....	37
4.4.1 Merkezde Tek Kaynak.....	38
<b>5. SONUÇLAR</b> .....	<b>41</b>

<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>43</b>
<b>7. ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>47</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: SIC’li Q-öğrenme çizelgeleme.....	17
Şekil 2.2: SIC’siz Q-öğrenme çizelgeleme.....	18
Şekil 2.3 : İletilen paket sayısına karşı zaman dilimi sayısı.....	20
Şekil 2.4 : İletilen paket sayısına karşı toplam paket sayısı.....	21
Şekil 2.5 : İletilen paket sayısına karşı döngü sayısı.....	22
Şekil 3.1 : En az zaman dilimi sayısına karşı SINR.....	29
Şekil 3.2 : En az zaman dilimi sayısına karşı iletim gücü.....	29
Şekil 4.1 : Merkezde tek kaynak için konfigürasyon.....	39



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Q-öğrenme çizelgeleme algoritması benzetim parametreleri .....	19
Çizelge 3.1 : Minimum uzunluk benzetim parametreleri.....	28
Çizelge 4.1 : Ağ benzetim parametreleri.....	37
Çizelge 4.2 : $\Gamma = 1.5$ için ağ performansı.....	37
Çizelge 4.3 : $\Gamma = 2$ için ağ performansı.....	38
Çizelge 4.4 : Merkezde tek kaynak için sonuçlar .....	39
Çizelge 4.5 : Birleşik ağ çizelgelemesi .....	40





## KISALTMALAR

<b>CDMA</b>	: Code Division Multiple Access (Kod Bölmeli Çoklu Erişim)
<b>NOMA</b>	: Non-Orthogonal Multiple Access (Dik Olmayan Çoklu Erişim)
<b>OMA</b>	: Orthogonal Multiple Access (Dik Çoklu Erişim)
<b>SC</b>	: Superposition Coding (Üstdüşüm Kodlaması)
<b>SIC</b>	: Successive Interference Cancellation (Ardışık Girişim İptali/Çıkarımı)
<b>SINR</b>	: Signal Interference Noise Ratio (Sinyal Girişim Gürültü Oranı)
<b>TDMA</b>	: Time Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)







## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$a$	Eylem
$a'$	Bir sonraki eylem
$a_{l,l'}$	$l$ ve $l'$ birleşik bağlarının çelişmeme durumunu ifade eden ikili değişken
$b_{i,j,l}$	$l$ birleşik bağının $(i,j)$ bağımlı içerme durumunu ifade eden ikili değişken
$B_{i,j}$	Düğüm $i$ 'den düğüm $j$ 'ye iletilecek toplam paket sayısı
$d_0$	Anten uzak alanı için bir referans mesafesi
$d_f$	$f$ akışının varış düğümü
$d_{ij}$	$i$ ve $j$ düğümleri arasındaki mesafe
$d_{ik}$	$i$ ve $k$ düğümleri arasındaki mesafe
$d_{iy}$	$i$ ve $y$ düğümleri arasındaki mesafe
$d_{iz}$	$i$ ve $z$ düğümleri arasındaki mesafe
$d_{xj}$	$x$ ve $j$ düğümleri arasındaki mesafe
$d_{xk}$	$x$ ve $k$ düğümleri arasındaki mesafe
$d_{xy}$	$x$ ve $y$ düğümleri arasındaki mesafe
$d_{xz}$	$x$ ve $z$ düğümleri arasındaki mesafe
$D_{i,j,m}$	Denklem alt sınırı ifadesi
$f$	Akış
$\mathcal{F}$	Akış hızı kümesi
$g_{i,j}^{dB}$	$i$ ve $j$ düğümleri arasındaki kanal kazancı
$H_{i,j}$	Denklem alt sınırı ifadesi
$I_j$	$j$ düğümünün komşu düğümleri
$I_k$	$k$ düğümünün komşu düğümleri
$I_m$	$m$ düğümünün komşu düğümleri
$M_{i,j}$	Denklem alt sınırı ifadesi
$N_0$	Toplanır beyaz Gauss gürültüsü
$P_{(i,j)}$	$i$ düğümünden iletimi yapılan $j$ düğümünde alınan sinyal gücü
$P_{ik}$	$i$ düğümünden iletimi yapılan $k$ düğümünde alınan sinyal gücü
$P_{k,j}$	$k$ düğümünden iletimi yapılan $j$ düğümünde alınan sinyal gücü
$P_{m,j}$	$m$ düğümünden iletimi yapılan $j$ düğümünde alınan sinyal gücü

$Q_{i,j}[t]$	$i$ düğümünden $j$ düğümüne $t$ zaman diliminde yapılan iletimin Q- değeri
$Q(s, a)$	$s$ durumu ve $a$ eyleminde hesaplanan Q-değeri
$Q(s', a')$	$s'$ durumu ve $a'$ eyleminde hesaplanan Q-değeri
$r^{dB}$	sönümlenme kaybı
$r_f$	$f$ akışının toplam akış hızı
$r_{i,j}(f)$	$f$ akışında $i$ düğümünden $j$ düğümüne olan akış hızı
$r_{i,j}[t]$	$i$ düğümünden $j$ düğümüne $t$ zaman diliminde yapılan iletimden elde edilen ödül
$r_{k,i}(f)$	$f$ akışında $k$ düğümünden $i$ düğümüne olan akış hızı
$r(s, a)$	$s$ durumu ve $a$ eyleminde verilen ödül
$R$	toplam akış hızı
$s$	durum
$s'$	bir sonraki durum
$S_f$	$f$ akışının kaynak düğümü
$SINR_{i,j}[t]$	$i$ düğümünden $j$ düğümüne $t$ zaman diliminde iletilen sinyalin sinyal girişim gürültü oranı
$SINR_{m,j}[t]$	$m$ düğümünden $j$ düğümüne $t$ zaman diliminde iletilen sinyalin sinyal girişim gürültü oranı
$t$	zaman dilimi
$T$	toplam zaman dilimi sayısı
$T_s$	en az zaman dilimi sayısı
$w_f$	$f$ akışının ağırlığı
$x_{i,j}[t]$	$i$ düğümünden $j$ düğümüne olan iletimin başarısını ifade eden ikili değişken
$x_{k,l}[t]$	$k$ düğümünden $l$ düğümüne olan iletimin başarısını ifade eden ikili değişken
$x_{m,n}[t]$	$m$ düğümünden $n$ düğümüne olan iletimin başarısını ifade eden ikili değişken
$y_{(i,j)(m)}[t]$	$(i,j)$ bağının ve $m$ düğümünden yapılan iletimin aynı anda çizelgelenmiş olma durumunu ifade eden ikili değişken

## **1. GİRİŞ**

Kablosuz haberleşme, teknolojik haberleşmenin kablosuz bir şekilde yapılmasını sağlayarak insanların hayatında önemli bir yer edinmiştir. Evde, okulda, işte insanlar kablosuz haberleşmeye bilgi edinmek ya da iletişim kurmak amacıyla kullanmaktadır. Hız, esneklik, ve ağ verimliliği özellikleriyle bilgi aktarımı ve iletişimde verimliliğin de artmasına katkıda bulunmaktadır. Askeri, kişisel alan ağları, kriz yönetimi, tıbbi ve çevresel uygulamalar gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Kablosuz haberleşmede spektral verimliliğin sağlanması gerekmektedir. Belirli bir alanda sınırlı bant genişliğinde hizmet verilebilecek kullanıcı sayısının yüksek olması kablosuz ağ performansında önem taşımaktadır.

### **1.1 Tezin Amacı**

Çalışmamız, Ardışık Girişim İptali yapılabilen kablosuz ağlarda minimum sürede iletim yapılan çizelgeyi optimizasyon yöntemleriyle bulmaktadır. Yine bu kablosuz ağlarda minimum sürede iletim yapılan çizelgeyi bulan öğrenme tabanlı pratik yöntemler geliştirmektedir. NOMA kullanabilen kablosuz ağlarda hem yol atama, hem de çizelgelemeyi beraber optimize edebilen bir yöntem geliştirmektedir.

### **1.2 Literatür Araştırması**

Bağ çizelgeleme, belirli bir zaman diliminde hangi bağların iletim yapacağına karar verir. Kablosuz ortam ve girişim sebebiyle kablosuz ağların önemli bir problemidir. Kablosuz ağlarda kullanıcı sayısı arttıkça yüksek çıktılı hizmetlere olan talep de artmaktadır. Girişim, kablosuz ağların performanslarını önemli bir biçimde sınırlamaktadır. Bu sebeple farklı girişim yönetimi tekniklerini içeren çizelgeleme algoritmaları pek çok çalışmada incelenmiştir. Klasik bağ çizelgeleme algoritmalarında, bir düğüm sadece başka bir düğüme sinyal iletebilir ya da sadece başka bir düğümden sinyal alabilir. Bu durumda, aynı anda yapılan tüm diğer iletimler girişim sayılır [1]. Bu algoritmalar, tek bir zaman diliminde sınırlı sayıda iletim yapabildikleri için kısıtlı performans göstermektedir.

Ardışık Girişim İptali (Successive Interference Cancellation- SIC), girişimi yönetmek için kullanılan bir diğer yöntemdir. Bu yöntemde, girişimden kaçınmak yerine girişim kullanılır. Aynı anda sinyal alımı ve girişimi reddetme kabiliyeti sebebiyle sistem performansını arttırmaktadır [1]. SIC’de, alıcıda istenilen sinyali çözmeden önce daha güçlü olan sinyaller çözülmelidir [2]. SIC, iletim yapan kullanıcıların kanal kazançlarının farklılıklarını kullanarak alınan sinyalleri sıralar ve sinyal çözülmesi bu sıralamaya göre art arda gerçekleşir. Çözümler, eğer alınan sinyal-girişim gürültü oranı belirli bir eşiğin üstündeyse başarılı olur. SIC’nin kablosuz ağ performansını iyileştirdiği gösterilmiştir [3]-[13]. Hücresel ağlarda ilk olarak çalışılmıştır. [3]’te, baz istasyonu alıcısının SIC kabiliyetinin olduğu bir yer-uydu bağı Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access- CDMA) sistemi önerilmiştir. Toplam iletim gücü ve kullanıcı algılama ve eleme sırasının optimizasyonu ile, önerilen algoritmanın geleneksel sıralamanın kullanıldığı duruma göre daha düşük iletim gücü elde ettiği gösterilmiştir. [4]’te, alıcıda SIC kullanılan uydu-yer bağı Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access- NOMA) çalışılmıştır. Sinyallerin doğru ve yanlış sıralandıkları durumlar için alıcıda çözülme süreleri gösterilmiştir. Sonuçlar, bir sinyalin çözülme süresinin kullanıcının baz istasyonuna olan mesafesinin artmasıyla azaldığını göstermiştir. [5]’te, merkezi olmayan çift yönlü NOMA tabanlı araçla her şey arası iletişim sistemi incelenmiştir. Yarı çift yönlü NOMA ve Dikgen Çoklu Erişim (Orthogonal Multiple Access- OMA) senaryolarında sistemler karşılaştırıldığında, yarı çift yönlü NOMA senaryosunun daha iyi elde edilebilir çıktı performansına sahip olduğu görülmüştür. Kablosuz tasarsız ağlarda SIC kullanımı ileri seviyede koordinasyon ve fazla sayıda kontrol mesajı içerdiği için bu tür senaryolarda uygulanabilirliği sınırlanmaktadır. [6]’da, kablosuz bir ağda birleşik yönlendirme ve çizelgeleme incelenmiştir. SIC’nin çıktı performansını 300% arttırdığı gösterilmiştir. [7], kablosuz bir ağda birleşik yönlendirme, çizelgeleme ve hız kontrolüne odaklanmıştır. Sonuçlara göre, SIC ve bit hızı ayarlaması kullanan bir ağda çıktı performansı SIC kullanmayan bir ağa göre 20% artmaktadır. [8]’de, birleşik çizelgeleme ve yönlendirme kullanılmaktadır. SIC kullanan 20 kullanıcılı bir ağda %47, 50 kullanıcılı bir ağda 43.5% performans artışı görülmüştür. [9]’da, işbirlikçi iletim, en fazla bağı çizelgelenmesi ve SIC birlikte çalışılmıştır. SIC’li ağda SIC kullanılmayan ağa göre daha fazla iyileşme olduğu gösterilmiştir. [10], birleşik girişim kullanımı ve kaçınması algoritması kullanarak, girişimden kaçınma modeline göre performansta 47% iyileşme göstermiştir. [11]’de, birleşik hareketli baz istasyonu ve

SIC ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. SIC'nin kullanılması 50 kullanıcıya sahip bir ağda en düşük çizelgeleme süresini SIC kullanılmayan bir ağa göre ortalama %34 azalttığı gösterilmiştir. [12], SIC tabanlı bir sualtili akustik ağ için bağı çizelgeleme ve güç ataması yapılmıştır. Benzetim sonuçları, önerilen algoritmanın sistem çıktısını Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access- TDMA)'e göre %100 iyileştirdiğini göstermiştir. [13]'te, SIC kullanılan enerji harmanlayan bir ağda, birleşik yönlendirme, ağ kodlama ve çizelgeleme çalışılmıştır. Sadece ağ kodlaması kullanılan duruma göre, ağ kodlaması ve SIC'nin birleştirilerek kullanılması iletim için gerekli zaman dilimi sayısını azaltmaktadır.

Karmaşık problemlere algoritmik çözümler bulmak amacıyla, makine öğrenmesi geleneksel yaklaşımlar yerine kullanılabilir bir seçenektir [14]. Makine öğrenmesi, kendisine verilen veriyi (eğitim verisi ya da çevreden elde edilen deneyimden gelen veriler) analiz eder ve bir sonraki eylemini görür [15]. Otomatik olarak çevrenin dinamiklerini fark etmek ve buna göre kısa sürede nasıl davranacağını belirlemek, makine öğrenmesinin algoritmalarının amaçlarındandır [16]. Haberleşme sistemlerinde makine öğrenmesi yöntemlerinin son zamanlarda yapılan araştırmalarda kullanıldığı görülmüştür. Örnek olarak, [17]'deki çalışma, bir akıllı şehirde, genetik algoritmaları kullanarak araçların program kodlarını yaymalarını incelemiştir. [18]'de yazarlar, pekiştirmeli öğrenmeyi araçlara özgü ağlarda kaynak ataması yapılmasında kullanmıştır. [19]'daki çalışmada, sualtili algılayıcı ağda veri toplama problemine, makine öğrenmesi yöntemi olan kümeleme kullanılarak odaklanılmıştır.

Makine öğrenmesi üç temel türü bulunmaktadır: öğreticiyle öğrenme, öğreticisiz öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme. Öğreticiyle öğrenmede, sistem modeli, girdiler ve girdilere karşılık gelen doğru çıktılardan oluşan eğitim verilerinden geliştirilmektedir (etiketli veri seti) [20]. Öğreticili öğrenmede amaç girdi-çıkı ilişkisini öğrenmektir [14]. Etiketler, geçmiş ve anlık bilgiler sistem tarafından kullanılarak istenilen çıktılar ile veri setindeki örüntüleri ilişkilendirerek çıktıları tahmin eden bir fonksiyon oluşturulmaktadır. İstenilen ve elde edilen sonuçlara göre algoritma sistem modelini uyarlar. Yeterli eğitim ile, sistem yeni girdi verileri için çıktıları bulabilir [21]. Öğreticisiz öğrenmede girdiler etiketsizdir yani çıktılarıyla eşleştirilmemiş girdiler bulunmaktadır. Çıkı vektörü bulunmadığı için verilerdeki gizli örüntüleri sistem kendisi keşfeder. Temel amaç, verileri benzerliklerine bakarak farklı gruplara ayırmaktır [20].

Pekiştirmeli öğrenme [22] öğreticili ya da öğreticisiz öğrenmeden farklıdır. Öğretim yapılmaktadır; ancak öğreticili öğrenmeye kıyasla öğretim belirli bir girdi için belirli bir çıktının olması yapısında değildir. Belirli bir girdi için belirli bir çıktı seçildiği sürece, dışsal eğitici olarak görülebilecek çevre, pekiştirmeli öğrenme algoritmasına pekiştirme sinyali gönderir. Bu çıktı, öğrenenin uygulayacağı eylemdir ve alınan geribildirim öğrenenin amacının ne kadar gerçekleştirildiğini belirten ödüdür [14]. Pekiştirmeli öğrenme, bir öğrenenin bir çevrede bir amacı gerçekleştirebilmek için nasıl davranması gerektiğini öğreten bir öğrenim sürecidir. Çevre öğrenene belirli bir eylemi seçmesini söylemez. Öğrenen hangi eylemlerin en yüksek ödülleri getirdiğini eylemleri deneyerek öğrenir [23]. Anlık ödül, sonraki durum ve tüm takip eden ödüller, eylemler tarafından etkilenir [22]. Öğrenme sürecinde, öğrenen var olan eylemlerden birini seçer ve bu seçimin kalitesini değerlendiren bir ödül alır. Bu seçimin kalitesi, öğreneni amaca yaklaştırıp yaklaştırmadığına bağlıdır. Çevresiyle bu şekilde etkileşimde bulunarak, pek çok eylem dener ve elde ettiği bilgiyle bir süre sonra en iyi ödülleri veren eylemleri seçmeyi öğrenir. Q-öğrenme [24], basit uygulamasıyla bilinen bir pekiştirmeli öğrenme algoritmasıdır. Öğrenen, çevreyi keşfederek ya da en iyi ödülü verdiği öğrenilmiş olan eylemi seçerek en iyi ödülleri veren eylemleri seçmeyi öğrenir.

Haberleşme ağlarında, kablosuz düğümler pekiştirmeli öğrenme kullanarak optimal ya da optimale yakın kararlar verebilirler [16]. Q-öğrenme kullanarak kablosuz ağlarda çizelgeleme yapılması literatürde bazı çalışmalarda incelenmiştir. [17]'de, Q-öğrenme kullanarak kablosuz tasarsız bir ağda hem yüksek sayıda paket iletiminin yapılabileceği hem de ortalama iletim gücünün en az seviyede tutulabileceği gösterilmiştir. [18]'de, Q-öğrenme kullanmayan algoritmalara kıyasla, Q-öğrenme kullanarak paket kaybının %60 azaldığı görülmüştür. [19]'da, Q-öğrenme ile ağda enerji tüketiminin ve ortalama iletim gecikmesinin azaltıldığı gösterilmiştir. Bu çalışmalarda, kablosuz tasarsız ağlara Q-öğrenmenin uygulanması çalışılmış olsa da, Q-öğrenme ve SIC yönteminin bir arada kullanılmasının sistem performansına etkileri çalışılmamıştır. Q-öğrenme ve SIC'nin kablosuz ağlarda bir arada kullanılmasının etkisini çalışan bazı çalışmalar bulunmaktadır. [20]'de, Q-öğrenme ve SIC kullanılarak sistem performansının optimizasyonu için kaynak ataması yapılmaktadır. [21]'de, SIC- güç kontrolü ve Q-öğrenme kullanan bir algoritma sistem kapasitesini arttırmak için önerilmiştir. [22]'de, Q-öğrenme ve SIC tabanlı güç atama algoritması

kullanıcıların performanslarını iyileştirmek için önerilmiştir. Bu çalışmalardaki algoritmalar SIC ve Q-öğrenmeyi bir arada kullanmaktadır; ancak bunlar hücreli ağlarda uygulanmaktadır, bazılarında çizelgeleme çalışılmamıştır ve gerçekçi bir kanal modeline sahip değildirler.

SIC, girişimi kullanan, alıcılarda aynı anda birden fazla sinyal olarak sistem performansını arttıran bir girişim yönetimi tekniğidir. Sinyallerin alıcılardaki çözümü, eğer alınan sinyal-girişim gürültü oranı belirli bir eşik üstündeyse doğrudur. Literatürdeki çalışmaların çoğu, SIC'yi, kablosuz ağlarda sistem çıktısını artırma amacıyla incelemiştir. [35]'te, SIC yönlendirme protokolü tasarımı ve atlama sayısı yönlendirmesine göre elde edilebilecek en yüksek sistem çıktısı incelenmiştir. [8]'de, birleşik çizelgeleme ve yönlendirme, SIC tabanlı kablosuz bir ağın sistem çıktı performansını arttırmak için çalışılmıştır. [7], birleşik yönlendirme, çizelgeleme ve hız kontrolünü sistem çıktısını arttırmak için kablosuz bir ağda incelemiştir. SIC'nin, kablosuz tasarsız ağlarda en az çerçeve uzunluğu ve yönlendirme için etkisini araştırmış çalışma pek bulunmamaktadır. En az çizelgeleme uzunluğu, düşük gecikme sağladığı için önemli bir kriterdir. [36]'daki çalışma, kablosuz ağlarda birden fazla kullanıcı algılaması ve girişim elemesi yapılan en az çizelgeleme zamanına odaklanmıştır. [37]'de, tek-atlamalı iletimlerin yapıldığı bir ağda paket çizelgelemesi ve en fazla paket iletim sayısının elde edilmesi çalışılmıştır. Ağ, SIC tabanlıdır ve [8]'dekine benzemektedir.

Literatürde, kablosuz ağlarda en az zamanda yönlendirme ve çizelgelemenin incelendiği bazı çalışmalar bulunmaktadır. [38]'de, en az zamanda çizelgeleme ve hız kontrolü problemi tek-atlamalı ağlarda ileticilerden alıcılara iletim yapmak için gereken süreyi en aza indirmek için çalışılmıştır. [39]'da, sabit olmayan zaman dilimi uzunluklarında, boyutları sabit olmayan paketlerin iletimlerinin en az zamanda çizelgelemesi incelenmiştir. Bağlardaki trafik talebinin verilmesiyle, kablosuz bir ağda birleşik güç kontrolü, hız ayarlaması ve çizelgeleme eniyilemesi çalışılmıştır. [40]'ta, belirli bir kuyruk boyutu kullanarak ve hangi kablosuz bağların ne kadar süre aktif olacağını belirleyerek en az zamanda çizelgeleme çalışılmıştır. [41]'de, zamanla değişen tek-atlamalı kablosuz ağlarda en az zamanda çizelgeleme ve hız kontrolü yapılmıştır. [42]'de, kablosuz ağlarda, sinyal-girişim gürültü oranı kısıtları altında en az zamanda çizelgeleme çalışılmıştır. [43]'te, kablosuz tasarsız bir ağda en yüksek ağ

yaşam süresi için enerji verimliliği çalışılmıştır. Bu çalışma, problemi tamsayı programlama eniyilemesi olarak formülleştirilmiştir. [44]'de, kablosuz algılayıcı ağlarda en yüksek yaşam ömrü ve en az yönlendirme için enerji verimli bir algoritma çalışılmıştır. [45]'de, çok atlamalı algılayıcı ağlarda en yüksek yaşam süresi için baz istasyonu destekli güç-farkındalığı olan yönlendirme çalışılmıştır. [46]'da, kablosuz algılayıcı ağlarda sistem yaşam süresinin en yüksek değerinin bulunması ve bu ağlarda farklı enerji tüketimiyle sonuçlanan farklı yönlendirme protokollerinin karşılaştırması yapılmıştır. Literatürde, SIC kullanan ya da kullanmayan kablosuz tasarsız ağlarda birleşik optimal yönlendirme ve çizelgeleme uzunluğu çalışılmamıştır.

Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access-NOMA), birden fazla kullanıcının aynı frekans kanalını kullandığı bir çoklu erişim yöntemidir. Dikgen Çoklu Erişim (Orthogonal Multiple Access- OMA)'ya göre, kullanıcı girişiminden kaçınmak için belirli bir zamanda sadece bir kullanıcı bir frekans kanalını kullanabilir. NOMA, güç alanında ya da kodlama alanında çoklama yaparak birden fazla kullanıcının zaman ve frekans kaynaklarını kullanmasına olanak sağlar [50]. Aynı anda birden fazla kullanıcıya iletim yaparak, OMA'ya göre büyük çapta bağlantı, iyileşmiş çıktı ve düşük iletim gecikmesi sağlar. OMA'da toplam kullanıcı sayısı dik kaynakların mevcut olmasına bağlıdır. Güç alanlı NOMA'da, birden fazla kullanıcının iletilerinde üstdüşüm kodlaması (superposition coding- SC) ile güç alanında çoklaması yapılır. Kullanıcıların kanal kazançlarına göre, iletim yapan kullanıcılara toplam iletim gücünden belirli bir oranda ayrılır. Alıcılarda, SIC kullanılarak çoklu sinyal ayrışımı yapılır. OMA'ya göre NOMA'nın bir sistemin çıktısını 30% arttırdığı gösterilmiştir [51]. NOMA'nın sağladığı özellikler sebebiyle, tasarsız ağlarda NOMA'nın kullanılması, aynı zaman diliminde bir kullanıcıdan yapılan iletimlerin sayısını arttırabilir ve birbirine iletim yapan kullanıcıların sayısını arttırıp, bir iletimi yönlendirmek için daha fazla bağ seçeneği sunabilir. Sinyaller bir kullanıcıda toplanır ve tüm iletim gücünü bir sinyali iletmek için kullanmak yerine aynı iletim gücünü aynı anda birden fazla sinyal iletmek için kullanılabilir.

Yukarıda bahsedilen makalelerde, çizelgeleme algoritmalarında bir zaman diliminde bir kullanıcı en fazla bir tane farklı kullanıcıya iletim yapabilir. NOMA'yı kullanmak, aynı kullanıcıların farklı kullanıcılara aynı zaman diliminde iletim yapmasını sağlayabilir. Böylece, iletimlerin daha kısa sürede tamamlanması daha fazla bağın bir



zaman diliminde çizelgelenmesiyle olur ve her iletim için daha fazla yönlendirme seçeneğiyle oluşan daha yüksek çıktı verebilen yollar bulunur.





## 2. Q-ÖĞRENME VE SIC TABANLI ÇİZELGELEME

### 2.1 Giriş

Çalışmamızda, Q-öğrenme SIC tabanlı bir ağa ve de SIC'nin kullanılmadığı bir ağa (girişimin gürültü olarak kabul edildiği) uygulanmıştır. [8]'deki çalışmadan faydalanarak, başarıyla iletilen paket sayısı için üst sınır oluşturacak iki optimal algoritma kullanılmıştır. Q-öğrenme algoritması ve SIC ile, en fazla paket iletimi için en iyi çizelgenin oluşturulması amaçlanmaktadır. Birinci optimal algoritmada ağda SIC kullanılmaktadır ve ikinci optimal algoritmada SIC kullanılmamakta, girişim gürültü kabul edilmektedir.

Q-öğrenmenin SIC tabanlı kablosuz dağıtık tasarsız ağda gerçekçi bir kanal modeliyle çizelgeleme oluşturmada kullanılmasıyla iletilen paket sayısının, Q-öğrenmenin kullanıldığı ama SIC'nin kullanılmadığı duruma kıyasla daha fazla olduğu gösterilmiştir. Buna ek olarak, SIC'siz optimal çizelgelemeye göre daha iyi performans ve SIC'li optimal çizelgelemeye göre belirli bir iletilecek başlangıç paket sayısına kadar benzer performans göstermiştir.

### 2.2 Sistem Modeli

N adet düğüm rasgele eşit dağıtılmıştır ve düğüm konumları sabittir. Birden fazla zaman dilimi bulunmaktadır ve her zaman diliminde birden fazla paket çizelgelenebilir. L adet bağ ve iletilecek B adet paket bulunmaktadır. Tüm alıcılarda ardışık girişim çıkarımı yapılabilmektedir (SIC).  $N_o$  toplanır beyaz Gauss gürültüsüdür. Bir düğüm aynı anda sinyal alımı ve iletimi yapamaz. Düğüm iletim güçleri sabittir.  $i$ 'den  $j$ 'ye olan iletimde,  $j$  düğümünde alınan sinyal gücü  $P_{(i,j)}$ 'dir.

Kanal kazançları sabittir. SINR (Signal-interference-plus-noise ratio), sinyal-girişim-artı-gürültü oranıdır.

Kanal kazançlarını hesaplamak için birleştirilmiş yol kaybı, sönümlenme ve gölgeleme modeli [32] kullanılmıştır:

$$g_{i,j}^{dB} = -PL_{d0} \times \gamma \times \log_{10} \left( \frac{d_{i,j}}{d_0} \right) - \Psi^{dB} - r^{dB} \quad (2.1)$$

$g_{i,j}^{dB}$ ,  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki kanal kazancı,  $\gamma$ , yol kaybı faktörü,  $d_{i,j}$ ,  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki mesafe,  $d_0$ , anten uzak alanı için bir referans mesafesi [32],  $\Psi^{dB}$  gölgeleme kaybı,  $r^{dB}$  sönümlenme kaybı,  $PL_{d0}$ ,  $d_0$ 'daki yol kaybıdır (dB olarak).

### 2.2.1 SIC tabanlı iletim

Ardışık Girişim Çıkarımı'nda (SIC), bir zaman diliminde bir düğüm birden fazla sinyal alırsa, bu sinyalleri arka arkaya çözebilir. Önce, düğümde alınan sinyaller en güçlüden en zayıfa sıralanır. Sonra, teker teker, en güçlü sinyalden başlayarak sinyaller çözülür ve düğümün aldığı toplam sinyalden çıkartılır. Bu işlem tüm sinyaller çözülene kadar devam eder ya da çözülemeyen bir sinyal ile karşılaşılırsa durdurulur [8].  $i$  düğümünden  $j$  düğüme,  $t$  zaman diliminde iletilen bir sinyalin çözülebilmesi için [8]:

$$SINR_{i,j}[t] = \frac{P_{i,j}}{\sum_{k \neq i}^{P_{k,j} \leq P_{i,j}} \sum_{l \in I_k} P_{k,j} \cdot x_{k,l}[t] + N_o} \geq \beta \quad (2.2)$$

$P_{k,j}$ ,  $i$  düğümü ile aynı anda  $t$  zaman diliminde iletim yapan  $k$  düğümlerinin,  $j$  düğümünde alınan ve  $P_{i,j}$ 'den küçük olan güçleridir.  $I_k$ ,  $k$  düğümlerinden sinyal iletimi planlanmış alıcı düğümlerdir.  $I_k$ ,  $k$ 'nın komşu düğümleridir.  $x_{k,l}[t]$ ,  $k$  düğümü  $l$  düğüme  $t$  zaman diliminde başarıyla iletim yapabilmişse 1, yapamamışsa 0 değerini alır [8].

## 2.2.2 Girişimin gürültü kabul edildiği iletim

Bu durumda,  $i$  düğümünden  $j$  düğümüne iletim yapılırken SINR  $\beta$ 'dan büyük veya eşit ise sinyal iletimi başarılı olur.  $j$  alıcısı, aynı anda gerçekleşen diğer iletimlerin tümünü gürültü olarak varsayar.  $i$  düğümünden  $j$  düğümüne yapılan iletimde SINR [8]:

$$SINR_{i,j}[t] = \frac{P_{i,j}}{\sum_{k \neq i} \sum_{l \in I_k} P_{k,j} \cdot x_{k,l}[t] + N_o} \geq \beta \quad (2.3)$$

## 2.3 Optimal Çözüm

Çözülmesi istenilen problem,  $0 \leq t \leq T$  olacak şekilde her  $t$  zaman diliminde hangi bağların aktif olacağını belirlenmesidir. İletilen paket sayısının en çoklanması hedefinin ifadesi,

$$\max_{\mathbf{x}} \sum_i \sum_j \sum_t x_{i,j}[t] \quad (2.4)$$

$\mathbf{x} = \{x_{i,j}[t]\}$  ikili çizelgeleme değişkenleri vektörü,  $x_{i,j}[t]$ ,  $i$  düğümünün  $j$  düğümüne iletimi başarılı olursa 1, olmazsa 0 değerini alır.

SIC'li optimal çözüm için,  $i$  düğümü  $j$  düğümüne başarılı bir şekilde iletim yaptığında (i.e.,  $x_{i,j}[t]=1$ ), bu durum  $j$  düğümünde alınan ve  $i$  düğümünden yapılan iletimden daha güçlü olan  $m$  düğümlerinden yapılan iletimlerin SINR'larının  $\beta$ 'dan büyük veya eşit olduğu anlamına gelir. Bu durum, aynı zamanda  $i$  düğümünden  $j$  düğümüne SINR'ın  $\beta$ 'dan büyük veya eşit olduğu anlamına gelir.  $m$  düğümünden  $n$  düğümüne iletim yapılmasının ifadesi  $\sum_{n \in I_m} x_{m,n}[t] = 1$ 'dir. Bunlara göre aşağıdaki ifade oluşturulabilir [8]:

$$\text{Eğer, } x_{i,j}[t]=1 \text{ ve } \sum_{n \in I_m} x_{m,n}[t] = 1 \text{ ise } SINR_{m,j}[t] \geq \beta \quad (2.5)$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, m \neq i, P_{m,j} > P_{i,j}, 1 \leq t \leq T)$$

$\lambda_m[t]$ , (2.5)'i basitleştirmek için oluşturulmuştur:

$$\lambda_m[t] = \sum_{n \in I_m} x_{m,n}[t] \quad (m \in \mathcal{N}, 1 \leq t \leq T) \quad (2.6)$$

Yarı çift yönlülük denklemi:

$$\lambda_j[t] + \frac{1}{|I_j|} \sum_{i \in I_j} x_{i,j}[t] \leq 1 \quad (j \in \mathcal{N}, 1 \leq t \leq T) \quad (2.7)$$

$x_{i,j}[t]=1$  ve  $\lambda_m[t]=1$  birleştirilip tek bir değişkene dönüştürülünce ( $y_{(i,j)(m)}[t]$ ):

$$y_{(i,j)(m)}[t] \geq x_{i,j}[t] + \lambda_m[t] - 1$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, m \neq i, P_{m,j} > P_{i,j}, 1 \leq t \leq T) \quad (2.8)$$

$$x_{i,j}[t] \geq y_{(i,j)(m)}[t]$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, m \neq i, P_{m,j} > P_{i,j}, 1 \leq t \leq T) \quad (2.9)$$

$$\lambda_m[t] \geq y_{(i,j)(m)}[t]$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, m \neq i, P_{m,j} > P_{i,j}, 1 \leq t \leq T) \quad (2.10)$$

$\lambda_m[t]$  ifadesi kullanılarak (2.5) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\text{Eğer, } x_{i,j}[t]=1 \text{ ve } \lambda_m[t]=1 \text{ ise } \text{SINR}_{m,j}[t] \geq \beta \quad (2.11)$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, m \neq i, P_{m,j} > P_{i,j}, 1 \leq t \leq T)$$

$x_{i,j}[t]=1$  ve  $\lambda_m[t]=1$  birleştirilip tek bir değişkene dönüştürünce,  $y_{(i,j)(m)}[t]$ 'yi (2.11)'de kullanarak:

$$\text{Eğer, } y_{(i,j)(m)}[t]=1 \text{ ise } \text{SINR}_{m,j}[t] \geq \beta \quad (2.12)$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, m \neq i, P_{m,j} > P_{i,j}, 1 \leq t \leq T)$$

(2.6)'yı kullanarak ve de (2.2) numaralı denklemde  $i$  yerine  $m$  koyarak  $\text{SINR}_{m,j}[t]$  ifadesi bulunur:

$$SINR_{m,j}[t] = \frac{P_{m,j}}{\sum_{k \neq m}^{P_{k,j} \leq P_{m,j}} P_{k,j} \cdot \lambda_k[t] + N_o} \geq \beta \quad (2.13)$$

(2.12) ve (2.13) kullanılarak (2.14) elde edilir:

$$P_{m,j} - \sum_{k \neq m}^{P_{k,j} \leq P_{m,j}} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_o \geq (1 - y_{(i,j)(m)}[t]) D_{i,j,m} \quad (2.14)$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, m \neq i, P_{m,j} > P_{i,j}, 1 \leq t \leq T)$$

$x_{i,j}[t]=1$  olduğunda:

$$\text{Eğer, } x_{i,j}[t]=1 \text{ ise } SINR_{i,j}[t] \geq \beta \quad (2.15)$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, 1 \leq t \leq T)$$

(2.15) ve (2.6) kullanarak (2.16) elde edilir:

$$P_{i,j} - \sum_{k \neq i}^{P_{k,j} \leq P_{i,j}} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_o \geq (1 - x_{i,j}[t]) H_{i,j} \quad (2.16)$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, 1 \leq t \leq T)$$

(2.17)'de,  $B_{i,j}$ ,  $i$  düğümünden  $j$  düğümüne iletilecek toplam paket sayısıdır. İletim için çizelgelenen paket sayısının iletilmek istenen toplam paket sayısından küçük veya eşit olması gerekmektedir:

$$B_{i,j} \geq \sum_t x_{i,j}[t] \quad (j \in \mathcal{N}, i \in I_j, 1 \leq t \leq T) \quad (2.17)$$

(2.6)'da,  $\lambda_m[t]$ ,  $m$  düğümü  $t$  zaman diliminde herhangi bir düğümüne iletim yapıyorsa değeri 1 olan ikili değişkendir. (2.8)'de,  $y_{(i,j)(m)}[t]$ ,  $x_{i,j}[t]=1$  ve  $\lambda_m[t]=1$  olduğunda değeri 1 olan ikili değişkendir. (2.9) ve (2.10)'da,  $y_{(i,j)(m)}[t]=1$  olduğunda,  $x_{i,j}[t]$  ve  $\lambda_m[t]$  de 1 değerini alır. (2.14) ve (2.16), alıcıda çözülecek sinyallerin SINR kısıtlarıdır

(hem  $j$  alıcısına iletimi planlanmış hem de başka alıcılara iletim yapan ve  $j$ 'de algılanan sinyaller). (2.14)'de, eğer  $y_{(i,j)(m)}[t] = 1$  ise  $SINR_{m,j}[t] \geq \beta$ .  $D_{i,j,m}$ ,  $P_{m,j} - \sum_{k \neq m}^{P_{k,j} \leq P_{m,j}} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_o$  'nin bir alt sınırıdır ve  $P_{m,j} - \sum_{k \neq m}^{P_{k,j} \leq P_{m,j}} \beta P_{k,j} - \beta N_o$  olarak kullanılmıştır. (2.16)'da, eğer  $x_{i,j}[t] = 1$  ise  $SINR_{i,j}[t] \geq \beta$ .  $H_{i,j}$ ,  $P_{i,j} - \sum_{k \neq i}^{P_{k,j} \leq P_{i,j}} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_o$  'nin bir alt sınırıdır ve  $P_{i,j} - \sum_{k \neq i}^{P_{k,j} \leq P_{i,j}} \beta P_{k,j} - \beta N_o$  olarak kullanılmıştır. SIC'li optimal çözümde (2.6), (2.7), (2.8), (2.9), (2.10), (2.14), (2.16) ve (2.17) kullanılmaktadır. SIC'siz optimal çözüm için, (2.6), (2.7), (2.17) ve,

$$P_{i,j} - \sum_{k \neq i} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_o \geq (1 - x_{i,j}[t]) M_{i,j} \quad (j \in \mathcal{N}, i \in I_j, 1 \leq t \leq T) \quad (2.18)$$

(2.4)'ü çözerken kullanılmaktadır.  $M_{i,j}$ ,  $P_{i,j} - \sum_{k \neq i} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_o$  'nin bir alt sınırıdır ve  $P_{i,j} - \sum_{k \neq i} \beta P_{k,j} - \beta N_o$  olarak kullanılmıştır. (2.15), (2.6) ve girişimin gürültü sayıldığı SINR denklemini kullanarak (2.18) elde edilmiştir.

## 2.4 Algoritma

### 2.4.1 SIC'li Q-öğrenme

Q-öğrenme [15], bir modele dayalı olmayan, çevresi hakkında bilgiye ihtiyaç duymayan bir pekiştirmeli öğrenme algoritmasıdır. Q-öğrenme'de amaç, bir ajanın eylemlerini gözlemleyip, bu eylemler için elde edilecek ödüllerin farkına varıp, alınan ödülleri en çoklayacak eylemleri seçmesidir. Bu çalışmada her düğümün paketlerini iletmek için Q-öğrenme kullanarak zaman dilimi belirlemesi ve alıcılarda aynı zaman diliminde birden fazla paket alınabilmesi için SIC kullanılması çalışılmıştır. Q-öğrenme'yi oluşturan elemanlar şunlardır [14]:

- 1) Ajanlar: Ajanlar çevreleri ile etkileşime geçerek en iyi ödülleri verecek eylemleri seçer ve uygularlar.
- 2) Ödül: Ödül bir eylemin cazip olup olmadığını belirler. Ajanlar seçecekleri eylemleri bu ödüle göre belirler.
- 3) Eylemler: Eylemler ajanın durumunu değiştirir ve alacağı ödülü belirler.



4) Durum: Ajanın içinde bulunduğu durum.

Q-öğrenme’de, hangi eylemlerin ödülleri ençoklayacağını öğrenmek ve eylem seçip, ödül alabilmek için ajan çevresiyle birden fazla döngüde etkileşime geçmelidir. Q-öğrenme, (durum, eylem) çiftlerinin değerlerini hesaplar ve bunlara Q-değerleri denir [26]. Ajanın döngüler süresince kazandığı tüm deneyimler Q-Tablosu’na kaydedilir. Bu tabloda her Q-değeri bir (durum, eylem) kombinasyonuna karşılık gelir [15].

Q-değerlerinin güncellenmesi denklemi aşağıdaki gibidir [15]:

$$Q(s, a) = (1 - \alpha)Q(s, a) + \alpha(r(s, a) + \gamma \max_{a'} Q(s', a')) \quad (2.19)$$

$s$  durum,  $a$  eylem,  $s'$  bir sonraki durum ve  $a'$  bir sonraki eylemdir.  $r$  ödüldür.  $\alpha$  öğrenme faktörüdür ve öğrenmenin ne kadar hızlı gerçekleşeceğini belirler. 0 ve 1 arasında bir değer verilir.  $\gamma$  iskonto faktörüdür ve bulunulan durumda gelecekte alınacak ödüllere ne kadar önem verileceğini belirler. 0 ve 1 arasında bir değer verilir.

Modelimizde,  $B$  adet paketi  $T$  zaman diliminde çizelgelemek için Q-öğrenme elemanları şu şekilde belirlenmiştir:

- 1) Ajanlar: Düğümler
- 2) Durumlar: İletim yapan düğümler
- 3) Eylemler: Alıcı düğümler, zaman dilimleri ( $\{i,j\}[t]$ )
- 4) Ödül: Eğer bir iletim başarılıysa ödül 1, değilse 0 değerini alır. İletim başarılı ise hatasız geribildirim yapıldığını varsayıyoruz.

Bir döngü (episode),  $T$  zaman diliminden oluşan bir çerçeve olarak belirlenmiştir. Q-değerlerinin güncellenmesi denklemi şu şekilde yapılmaktadır:

$$Q_{i,j} [t] = (1 - \alpha) Q_{i,j} [t] + \alpha (r_{i,j} [t]) \quad (2.20)$$

$i$  iletim yapan düğüm,  $j$  alıcı düğüm,  $t$  zaman dilimi,  $\alpha$  öğrenme faktörüdür, ve ödül  $r$  başarılı iletim sonucunda 1 değerini alır. Kablosuz tasarsız ağlarda düğümler ağ

hakkında sınırlı bilgiye sahiptirler. Her düğüm komşusunun ID'sini ve iletim başarılı olursa pozitif geribildirimini bilmektedir.

$\epsilon$ -greedy yöntemi [24] bir sonraki eylemi belirlemek için kullanılır. Burada  $\epsilon$  keşif katsayıdır. Bu yöntemde, keşif için  $\epsilon$  olasılıkla rasgele bir eylem seçilir ya da en yüksek Q-değerini veren eylem  $1 - \epsilon$  olasılıkla seçilir. Bir düğümün, yüksek ödül veren eylemleri sömürü yoluyla seçmesi gerekmektedir. Bunu yapabilmesi için de keşif yoluyla yüksek ödül veren eylemleri bulması gerekir [14].

Şekil 2.1'de,  $\mathbf{Q}$ , Q-Tablosu'dur ve başlangıç değeri 0'dır.  $\epsilon_i$  her  $i$  düğümünün keşif katsayısı,  $\alpha$  sabit öğrenme faktörü, algoritmanın öğrenmenin gerçekleşmesi için kullandığı  $N_e$  döngü sayısı (i.e. zaman çerçevesi, iterasyon)'dır.  $P_{i,j}$ ,  $i$  düğümünden iletilen sinyalin  $j$  düğümünde alınan gücüdür.  $lp_{i,j}$ ,  $(i,j)$  bağından iletmeyi bekleyen paket sayısıdır. Başlangıçta  $lp_{i,j} = B_{i,j}$ 'dir.  $np_i$ ,  $i$  düğümünden iletilecek paket sayısıdır. Başlangıçta  $np_i = \sum_{j \in I_i} B_{i,j}$ 'dir.

Algoritma, alınan sinyal güçlerini ( $P_{i,j}$ ) ve her bağda iletilebilecek paket sayılarını ( $B_{i,j}$ ) kullanır ve  $x_{i,j}[t]$ ,  $\forall i,j \in [1,N]$  çizelgesini oluşturur (Satır 1-2). Başlangıç değerleri (Satır 3)'de belirlenmiştir. Algoritmanın döngüleri (Satır 4-38)'de gösterilmiştir. Her döngüde keşif ya da sömürü rasgele gerçekleşir (Satır 7- 11). (Satır 6-22)'de her düğüm her zaman dilimine bir paket atar. Bu, rasgele (keşif) ya da en yüksek Q-değerine sahip bağı seçerek (sömürü) olur. İletimler belirlenmiş çizelgeye göre gerçekleşir. Her düğüm alınan sinyalleri çözmeye çalışır.

Bir düğüm, kendisine planlı iletilen sinyali çözebilmek için, bu sinyale ek olarak alınan daha büyük güce sahip sinyalleri de çözmesi gerekmektedir (Satır 29-32). Bir düğüm aynı anda iletim de yapamaz (Satır 27). Q-tablosu ödüllere (i.e., başarılarla) göre güncellenir (Satır 36). (Satır 37)'de keşif katsayısı güncellenir. Her düğümün kendi keşif katsayısı vardır. İletilen paket sayısı oranı arttıkça, keşif katsayısı azalır. Eğer bir düğüm bir döngüde tüm paketlerini iletmişse, keşif yapmayı sonlandırır. (Satır 38)'de, başarı ile iletilen paketlerden (i.e.,  $i,j,t$  s.t.  $s_{i,j}[t] = 1$ ) çizelge elde edilir.

---

**Algorithm 1** Q-learning Scheduling with SIC
 

---

```

1: Input:  $P_{i,j}, B_{i,j}, \forall i, j \in [1, N]$ 
2: Output: Schedule  $x_{i,j}[t]$ 
3: Initialize:  $Q = 0, \epsilon_i = 0.1, \alpha = 0.1, N_e, lp_{i,j} = B_{i,j},$ 
    $np_i = \sum_j lp_{i,j}, \forall i, j \in [1, N]$ 
4: for  $e = 1 : N_e$  do
5:   Initialize:  $lp_{i,j} = B_{i,j}, np_i = \sum_j lp_{i,j}, \forall i, j \in [1, N];$ 
6:   for  $i = 1 : N$  do
7:     if  $\text{rand} < \epsilon_i$  then
8:       exploration;
9:     else
10:      exploitation;
11:    end if
12:    for  $t = 1 : T$  do
13:      if exploration then
14:        randomly choose a receiver node  $j^*$  such that
15:         $lp_{i,j^*} > 0$  and assign to time slot  $t$ ;
16:      else
17:         $[j^*] = \underset{j:lp_{i,j} > 0}{\text{argmax}} Q(i, j)[t] \forall t;$ 
18:      end if
19:       $x_{i,j^*}[t] = 1, lp_{i,j^*} = lp_{i,j^*} - 1, np_i = np_i - 1;$ 
20:      if  $np_i = 0$  then
21:        break;
22:      end if
23:    end for
24:  Initialize  $s = 0, r = 0;$ 
25:  for  $t = 1 : T$  do
26:    for  $\forall (i, j)$  s.t.  $x_{i,j}[t] = 1$  do
27:      if  $\sum_{l \in I_j} x_{j,l}[t] = 0$  then
28:        Set  $\mathcal{K} = \{k \in N \mid \sum_{l \in I_k} x_{k,l} = 1, P_{kj} \geq P_{ij}\}$ 
29:         $SINR_{k,j}[t] = \frac{P_{kj}}{\sum_{k' \in \mathcal{K}, k' \neq k}^{P_{k',j} \leq P_{kj}} \sum_{l \in I_{k'}} P_{k',j} x_{k',l}[t] + N_o}, \forall k \in \mathcal{K}$ 
30:        if  $SINR_{k,j}[t] > \beta, \forall k \in \mathcal{K}$  then
31:          Set  $s_{i,j}[t] = 1$  and  $r_{i,j}[t] = 1;$ 
32:        end if
33:      end if
34:    end for
35:  end for
36:   $Q_{i,j}[t] = (1 - \alpha)Q_{i,j}[t] + \alpha r_{i,j}[t], \forall i, j \in [1, N], \forall t \in [1, T];$ 
37:   $\epsilon_i = 0.9\epsilon_i + 0.1 \times 0.1 \left( 1 - \frac{\sum_{j \in I_i} \sum_t s_{i,j}[t]}{\sum_{j \in I_i} B_{ij}} \right) \forall i \in [1, N];$ 
38: end for
39: Return:  $x = s;$ 

```

---

Şekil 2.1: Algoritma 1. SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme.

## 2.4.2 SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme

SIC'siz Q-öğrenme çizelgelemesi, SIC'li Q-öğrenme çizelgelemesine benzemektedir ancak SIC'nin uygulandığı kısım değiştirilmiştir.  $\mathbf{s}$  ve  $\mathbf{r}$ 'nin başlangıç değerlerinin 0'a eşitlendiği kısımdan itibaren, SIC'nin uygulandığı bölüm (Satır 24-37) Şekil 2.2 ile değiştirilmiştir. Tüm zaman dilimleri için (Satır 2) ve iletim yapan bağlar için (Satır 3) planlı iletimler kontrol edilir. (Satır 4), yarı çift yönlülüğü kontrol eder. (Satır 5-8) en az SINR eşiğini kontrol etmektedir. Algoritmada, SIC uygulanmamaktadır. Ödül tanımı, Q-tablosu güncellenmesi ve keşif katsayısı güncellenmesi aynı şekildedir.

**Algorithm 2** Q-learning Scheduling without SIC (first part is the same)

```
1: Initialize  $\mathbf{s} = 0, \mathbf{r} = 0$ ;  
2: for  $t = 1 : T$  do  
3:   for  $\forall(i, j)$  s.t.  $x_{i,j}[t] = 1$  do  
4:     if  $\sum_{l \in I_j} x_{j,l}[t] = 0$  then  
5:        $SINR_{i,j}[t] = \frac{P_{i,j}}{\sum_{k \neq i} \sum_{l \in I_k} P_{k,j} x_{k,l}[t] + N_0}$   
6:       if  $SINR_{i,j}[t] > \beta$  then  
7:         Set  $s_{i,j}[t] = 1$  and  $r_{i,j}[t] = 1$ ;  
8:       end if  
9:     end if  
10:  end for  
11: end for  
12:  $Q_{i,j}[t] = (1 - \alpha)Q_{i,j}[t] + \alpha r_{i,j}[t], \forall i, j \in [1, N], \forall t \in [1, T]$ ;  
13:  $\epsilon_i = 0.9\epsilon_i + 0.1 \times 0.1 \left( 1 - \frac{\sum_{j \in I_i} \sum_t s_{t,j}[t]}{\sum_{j \in I_i} B_{tj}} \right) \forall i \in [1, N]$ ;
```

Şekil 2.2: Algoritma 2. SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme.

## 2.5 Benzetimler

Benzetimler toplam paket sayısı  $B$ , zaman dilimi sayısı  $T$  ve döngü sayısı *episodes* için yapılmıştır. Dört algoritma karşılaştırılmıştır: 1) SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme 2) SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme, 3) SIC'li optimal çizelgeleme and 4) SIC'siz optimal çizelgeleme. Sonuçlar 100 adet bağımsız denemenin ortalamasıdır. SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme ve SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme için iletilen maksimum paket sayıları ve iletilen paket sayılarının 95. yüzdelik değerleri çizdirilmiştir. Çizelge 2.1'de benzetim parametreleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Q-öğrenme çizelgeleme algoritmasında kullanılan parametreler.

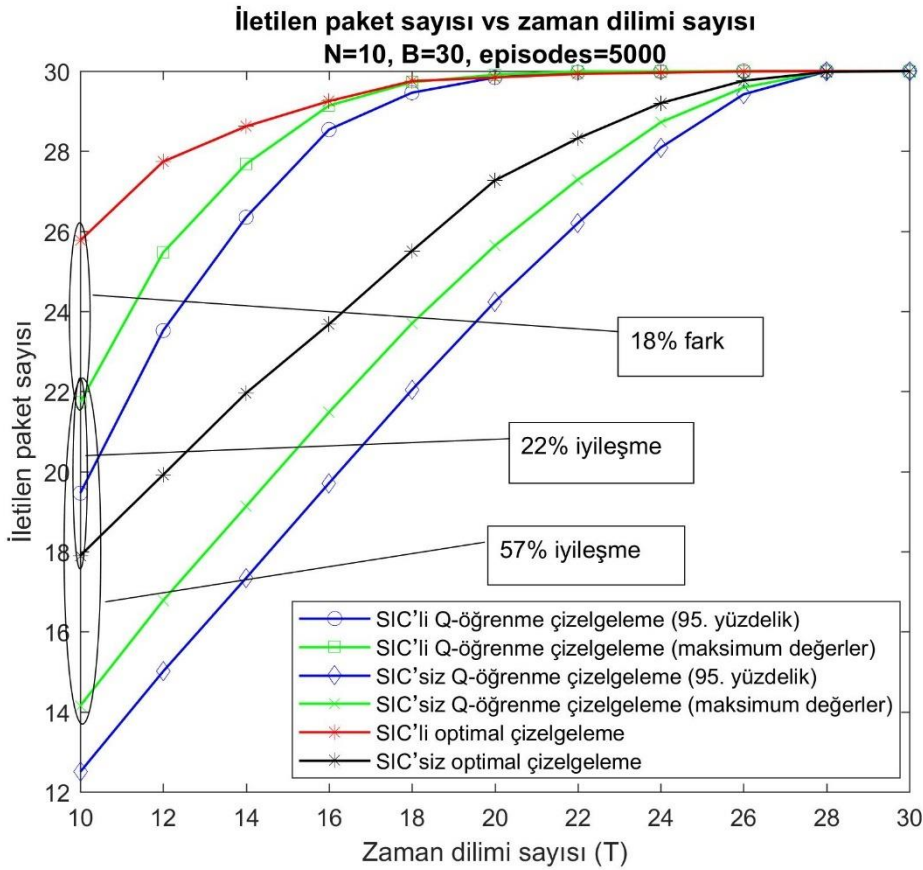
Parametre	Tanım	Değer
$N$	Düğüm sayısı	10
$D_{max}$	Ağ alanı yarıçapı	100 metre
$\gamma$	Yol kaybı faktörü	2.5
$N_o$	AWGN Gürültü gücü	$10^{-5}$ W
$P_t$	Düğüm iletim gücü	0.3 W
$\beta$	SINR eşiği	1.5
$\epsilon$	Keşif katsayısı	0.1
$\alpha$	Öğrenme faktörü	0.9
$Episodes$	Döngü sayısı	5000

Şekil 2.3'te ortalama iletilen paket sayısına karşı zaman dilimi sayısı gösterilmektedir. Zaman dilimi sayısı arttıkça her algoritma için iletilen paket sayısı da artmaktadır ve 30 pakete ulaşmaktadır. SIC'li optimal çizelgeleme en iyi performansı göstermektedir. T'nin düşük değerlerinde girişim sebebiyle daha az paket çizelgelenebilmektedir.

T=10'da, SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme ve SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme maksimum değerlerine bakıldığında, SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme'den %57 daha fazla paket iletebiliyor. SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme maksimum değerleri SIC'siz optimal çizelgelemeye göre %22 daha iyi performans gösteriyor. SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme maksimum değerleri ve SIC'li optimal çizelgeleme arasında %18 performans farkı bulunuyor.

T=16'dan T=30'a SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme maksimum değerleri SIC'li optimal çizelgelemeye yakın performans göstermektedir. İletilen paket sayısının 95. yüzdelik değerleri için, SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme ve SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme

arasında %57.6 iyileşme görülmektedir. SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme (95. yüzdellik), SIC'siz optimal çizelgelemeye göre %10 iyileşme göstermektedir. SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme (95. yüzdellik) ve SIC'li optimal çizelgeleme arasında %32 fark görülmektedir. T=20'den T=30'a, SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme (95. yüzdellik) SIC'li optimal çizelgelemeye yakın performans göstermektedir.



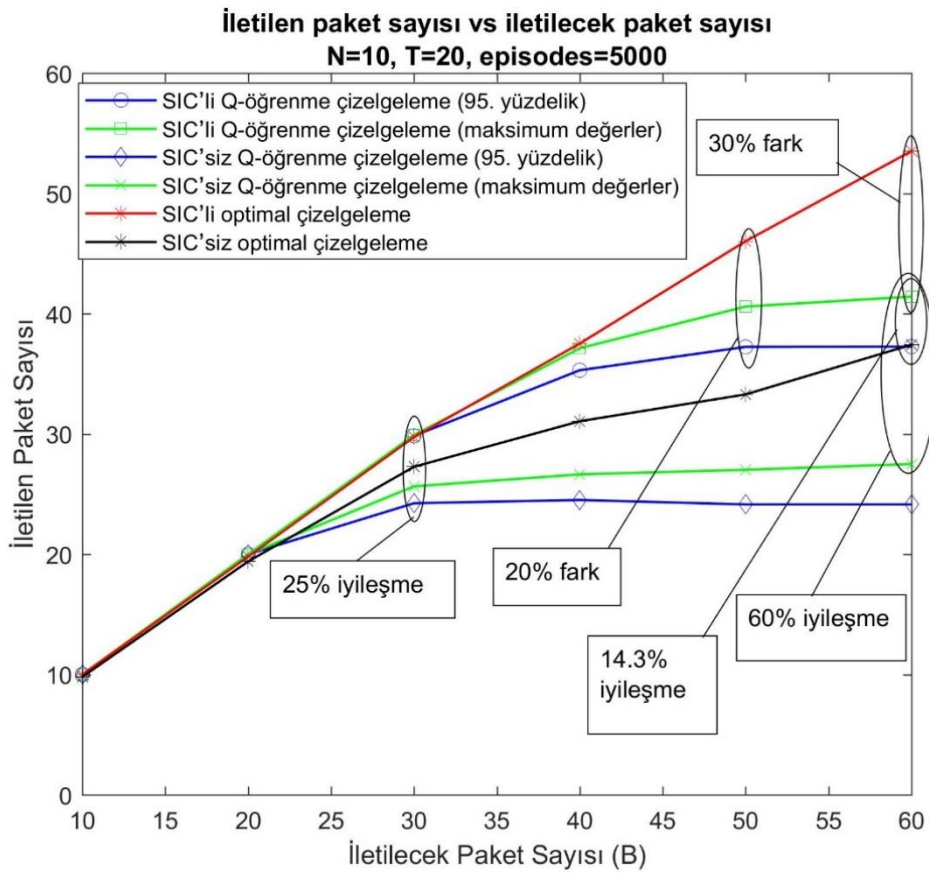
Şekil 2.3 : İletilen paket sayısına karşı zaman dilimi sayısı (N=10, B=30, episodes=5000).

Şekil 2.4'te iletilen ortalama paket sayısına karşı toplam paket sayısı gösterilmektedir. Bütün algoritmalar için, iletilecek paket sayısı arttıkça, iletilen paket sayıları azalmaktadır. SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme ve SIC'li optimal çizelgeleme için B=30'dan itibaren iletilen paket sayıları toplam paket sayılarına göre azalmaktadır. SIC'siz optimal çizelgeleme ve SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme için bu durum B=20'de başlamaktadır.

B=60'ta, SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme maksimum değerleri için, algoritma SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme maksimum değerlerine kıyasla %60 performans artışı

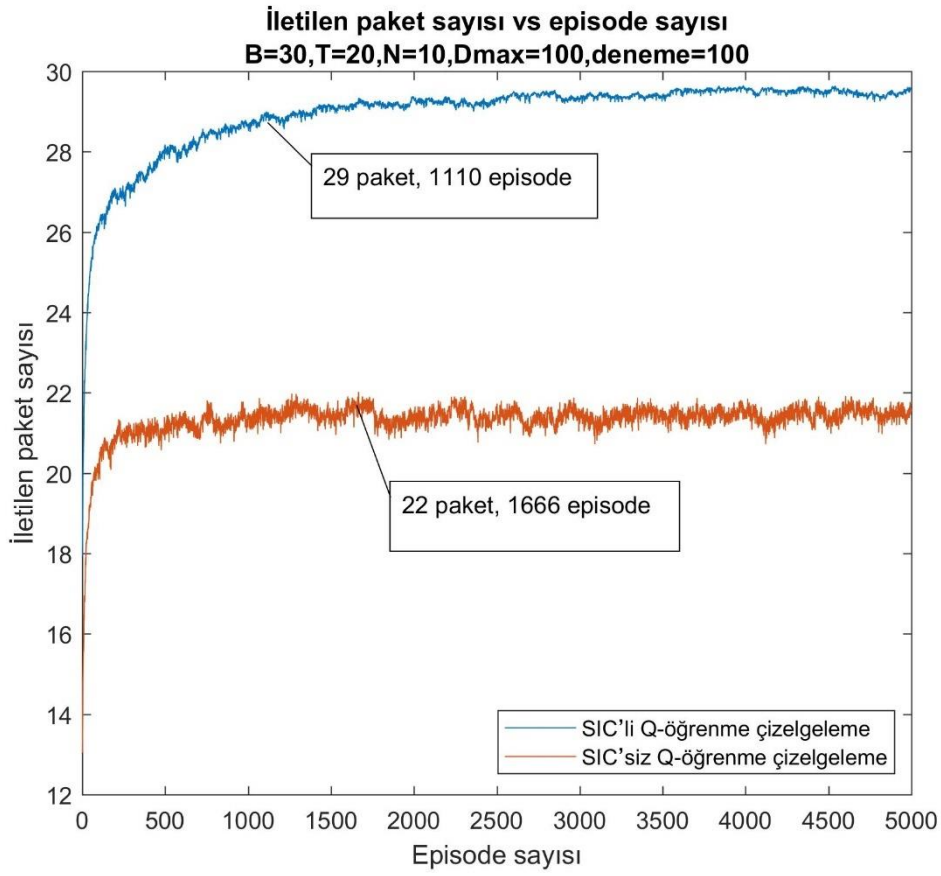
göstermektedir. SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme maksimum değerleri SIC'siz optimal çizelgelemeye kıyasla %14.3 daha iyi performans göstermektedir. SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme maksimum değerleri ve SIC'li optimal çizelgeleme arasında %30 performans farkı vardır. B=10'dan B=40'a SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme maksimum değerleri SIC'li optimal çizelgelemeye yakın performans göstermektedir. Çizelgelenen paketlerin 95. yüzdelik değerleri için, SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme'ye göre B=30'da %25 performans iyileşmesi göstermektedir.

B=20 ve B=60 arasında, SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme (95. yüzdelik), SIC'siz optimal çizelgelemeye göre iyileşme gösteriyor; fakat B=60'da ikisi de aynı sayıda paket iletiyor. B=50'de SIC'li optimal çizelgeleme ve SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme (95. yüzdelik) arasında %20 performans farkı bulunmaktadır; fakat B=10'dan B=30'a SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme (95. yüzdelik) SIC'li optimal çizelgelemeye benzer performans göstermektedir.



Şekil 2.4 : İletilen paket sayısı vs toplam paket sayısı (N=10, T=20, episodes=5000).

Şekil 2.5'te iletilen paket sayısına karşı döngü sayısı gösterilmektedir. SIC'li Q-öğrenme çizelgeleme 100 döngüde çabucak 24 pakete yakın iletim yapmayı öğreniyor. 200 döngüde 26 paket iletmeyi öğreniyor. Lokal optimumda kalmayıp daha fazla paket ileterek 2000 döngüye ulaşmadan 29 paket iletmeyi öğreniyor. SIC'siz Q-öğrenme çizelgeleme 18 paket iletmeyi öğrendikten sonra 2000 döngüye gelmeden 22 pakete doğru yakınsamaya başlıyor. SIC'li Q-öğrenme çizelgelemenin kısa zamanda yüksek sayıda paket iletebildiği için gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılması uygundur.



Şekil 2.5 : İletilen paket sayısına karşı döngü sayısı.



### **3. ARDIŞIK GİRİŞİM İPTALİ KULLANAN KABLOSUZ TASARSIZ AĞLARDA BİRLEŞİK OPTİMAL YÖNLENDİRME VE MİNİMUM UZUNLUK ÇİZELGELEME**

#### **3.1 Giriş**

Bu kısımda, Ardışık Girişim Çıkarımı (Successive Interference Cancellation- SIC) tabanlı dağıtık kablosuz tasarsız bir ağda birleşik optimal yönlendirme ve en kısa sürede çizelgeleme çalışılmıştır. Optimal çözüm, SIC kullanılan bir ağda, verilen bir akış hızında, çizelgeleme için gereken en az zaman dilimi sayısını bulmaktadır. SIC kullanan optimal çözümün performansı, girişimin gürültü olarak kullanıldığı durumla karşılaştırılmaktadır. Sonuçlara göre, SIC kullanan optimal çözüm, SIC kullanmayan optimal çözümün performansına kıyasla daha belirgin bir iyileşme göstermiştir.

Bu çalışmanın amacı kaynak düğümlerden varış düğümüne en az sayıda zaman dilimi kullanarak iletimlerin yapılması için birleşik yönlendirme ve çizelgeleme eniyilemesidir. Amaç en az çizelgeleme uzunluğunu bulmaktır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak eniyileme problemi, dağıtık ve SIC kullanan kablosuz bir ağ için çalışılmıştır. Buna ek olarak girişimi gürültü kabul eden, girişimden kaçınan bir ağ da incelenmiştir. Gerçekçi bir kanal modeli kullanılmıştır. SIC kullanan ve kullanmayan optimal algoritmaların, ağdaki farklı akış hızları için performansları karşılaştırılmıştır.

#### **3.2 Sistem Modeli**

$N$  adet düğüm rasgele eşit dağıtılmıştır ve düğüm konumları sabittir.  $S$  adet kaynak,  $F$  adet akış ve tek bir varış düğümü ( $D$ ) bulunmaktadır. Her iletime bir zaman diliminin atandığı bir iletim çerçevesi varsayıyoruz.  $T$ , bir çerçevedeki zaman dilimi sayısı ve en az değerinin bulunacağı amaçtır. Aynı zaman dilimine atanmış iletimler birbirlerine girişime sebep olurlar. Tüm düğümlerde SIC yapılabildiğini ve girişim olan iletimlerin çözülüp elenecek kadar güçlü olduğunu varsayıyoruz.  $N_o$ 'ın, güç spektral yoğunluğu

olduğunu ve toplanır beyaz Gauss gürültü kanalını varsayıyoruz. Dügümler yarı çift yönlüdür, öyle ki aynı anda sinyal alımı ve iletimi yapılamaz. SINR (signal-interference-plus-noise ratio), sinyal-girişim-artı-gürültü oranıdır.

Kanal kazançlarını hesaplamak için birleştirilmiş yol kaybı, sönümlenme ve gölgelemeyi içeren bir model [32] kullanılmıştır:

$$g_{i,j}^{dB} = -PL_{d0} - 10 \times \gamma \times \log_{10}(d_{i,j}/d0) - \psi^{dB} - r^{dB} \quad (3.1)$$

$g_{i,j}^{dB}$ ,  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki kanal kazancı,  $\gamma$ , yol kaybı faktörü,  $d_{i,j}$ ,  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki mesafe,  $d0$ , anten uzak alanı için bir referans mesafesi [23],  $\psi^{dB}$  gölgeleme kaybı,  $r^{dB}$  sönümlenme kaybı,  $PL_{d0}$ ,  $d0$ 'daki yol kaybıdır (dB olarak).  $i$  'den  $j$ 'ye olan iletimde,  $j$  düğümünde alınan sinyal gücü  $P_{i,j}$ 'dir.  $P_{i,j} = P_t \times g_{i,j}$  'dir ve  $P_t$  sabit iletim gücüdür.

### 3.2.1 SIC tabanlı iletim

SIC, bir zaman diliminde bir düğüm birden fazla sinyal alırsa, bu sinyalleri arka arkaya çözebilir. Önce, düğümde alınan sinyaller en güçlüden en zayıfa sıralanır. Sonra, teker teker, en güçlü sinyalden başlayarak sinyaller çözülür ve düğümün aldığı toplam sinyalden çıkartılır. Bu işlem tüm sinyaller çözülene kadar devam eder ya da çözülemeyen bir sinyal ile karşılaşılırsa durdurulur [8].  $i$  düğümünden  $j$  düğümüne,  $t$  zaman diliminde iletilen bir sinyalin çözülebilmesi için [8]:

$$SINR_{i,j}[t] = \frac{P_{i,j}}{\sum_{k \neq i}^{P_{k,j} \leq P_{i,j}} \sum_{l \in I_k} P_{k,j} \cdot x_{k,l}[t] + N_o} \geq \beta \quad (3.2)$$

$P_{k,j}$ ,  $i$  düğümü ile aynı anda  $t$  zaman diliminde iletim yapan  $k$  düğümlerinin,  $j$  düğümünde alınan ve  $P_{i,j}$ 'den küçük olan güçleridir.  $I_k$ ,  $k$  düğümlerinden sinyal iletimi planlanmış alıcı düğümlerdir.  $I_k$ ,  $k$ 'nın komşu düğümleridir.  $x_{k,l}[t]$ ,  $k$  düğümü  $l$  düğümüne  $t$  zaman diliminde başarıyla iletim yapabilmişse 1, yapamamışsa 0 değerini alır [8].

### 3.2.2 Girişimin gürültü kabul edildiği iletim

Bu durumda,  $i$  düğümünden  $j$  düğümüne iletim yapılırken SINR  $\beta$ 'dan büyük veya eşit ise sinyal iletimi başarılı olur.  $j$  alıcısı, aynı anda gerçekleşen diğer iletimlerin tümünü gürültü olarak varsayar.  $i$  düğümünden  $j$  düğümüne yapılan iletimde SINR [8]:

$$SINR_{i,j}[t] = \frac{P_{i,j}}{\sum_{k \neq i} \sum_{l \in I_k} P_{k,j} \cdot x_{k,l}[t] + N_o} \geq \beta \quad (3.3)$$

### 3.3 Problem Formülasyonu

Problem, kaynaklardan varış düğümüne veri iletiminde, bir çerçevenin çizelgelenebilmesi için gereken en az sayıda zaman dilimi sayısının belirlenmesidir. Zaman dilimi sayısını en aza indirme amacının ifadesi,

$$\min_{1 \leq T_s \leq T} \{T_s\} \quad (3.4)$$

$T$ , yeterince büyük bir tamsayı,  $T_s$  çizelgeleme uzunluğu yani çerçevedeki zaman dilimi sayısı (amaç),  $x_{i,j}[t]$ ,  $i$  düğümü  $j$  düğümüne başarıyla  $t$  zaman diliminde iletim yapabiliyorsa 1, yapamıyorsa 0 olur. Amacın kısıtları:

$$x_{i,j}[t] \times t \leq T_s \quad (3.5)$$

$$\lambda_m[t] = \sum_{n \in I_m} x_{m,n}[t] \quad (m \in \mathcal{N}, 1 \leq t \leq T) \quad (3.6)$$

$$\lambda_j[t] + \frac{1}{|I_j|} \sum_{i \in I_j} x_{i,j}[t] \leq 1 \quad (j \in \mathcal{N}, 1 \leq t \leq T) \quad (3.7)$$

$$y_{(i,j)(m)}[t] \geq x_{i,j}[t] + \lambda_m[t] - 1$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, m \neq i, P_{m,j} > P_{i,j}, 1 \leq t \leq T) \quad (3.8)$$

$$x_{i,j}[t] \geq y_{(i,j)(m)}[t]$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, m \neq i, P_{m,j} > P_{i,j}, 1 \leq t \leq T) \quad (3.9)$$

$$\lambda_m[t] \geq y_{(i,j)(m)}[t]$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, m \neq i, P_{m,j} > P_{i,j}, 1 \leq t \leq T) \quad (3.10)$$

$$P_{m,j} - \sum_{k \neq m}^{P_{k,j} \leq P_{m,j}} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_0 \geq (1 - y_{(i,j)(m)}[t]) D_{i,j,m}$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, m \neq i, P_{m,j} > P_{i,j}, 1 \leq t \leq T) \quad (3.11)$$

$$P_{i,j} - \sum_{k \neq i}^{P_{k,j} \leq P_{i,j}} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_0 \geq (1 - x_{i,j}[t]) H_{i,j}$$

$$(j \in \mathcal{N}, i \in I_j, 1 \leq t \leq T) \quad (3.12)$$

$$\sum_{j \in I_i} r_{i,j}(f) = r(f), (f \in \mathcal{F}, i = s_f) \quad (3.13)$$

$$\sum_{k \in I_i} r_{k,i}(f) = r(f), (f \in \mathcal{F}, i = d_f) \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in I_i}^{j \neq s(f)} r_{i,j}(f) = \sum_{k \in I_i}^{k \neq d(f)} r_{k,i}(f) (f \in \mathcal{F}, i \neq s(f), d(f)) \quad (3.15)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{F}}^{s(f) \neq j, d(f) \neq i} r_{i,j}(f) \leq \sum_{t=1}^T R \cdot x_{i,j}[t] (f \in \mathcal{F}, i \neq s(f), d(f)) \quad (3.16)$$

Kısıt (3.5), tüm çizelgelemenin, çerçeveye ait  $T_s$  adet zaman dilimi içerisinde yapılacağını belirtir. (3.6)'da,  $\lambda_m[t]$ , eğer  $m$  düğümü  $t$  zaman diliminde başka bir düğüme iletim yapıyorsa 1 değerini alan ikili değişkendir. (3.7), yarı çift yönlülüğü belirtir. (3.8)'de,  $y_{(i,j)(m)}[t]$ ,  $x_{i,j}[t]=1$  ve  $\lambda_m[t]=1$  olduğunda 1 olan ikili değişkendir. (3.9) ve (3.10)'da,  $y_{(i,j)(m)}[t]=1$  olduğunda  $x_{i,j}[t]$  ve  $\lambda_m[t]$  de 1 olur. (3.11) ve (3.12) düğümlerde alınan sinyallerin sinyal-girişim gürültü oranı kısıtlarıdır. (3.11)'de,

$D_{i,j,m}, P_{m,j} - \sum_{k \neq m}^{P_{k,j} \leq P_{m,j}} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_o$  ifadesinin bir alt sınırıdır ve  $P_{m,j} - \sum_{k \neq m}^{P_{k,j} \leq P_{m,j}} \beta P_{k,j} - \beta N_o$  olarak kullanılmıştır. (3.12)'de,  $H_{i,j}, P_{i,j} - \sum_{k \neq i}^{P_{k,j} \leq P_{i,j}} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_o$  ifadesinin bir alt sınırıdır ve  $P_{i,j} - \sum_{k \neq i}^{P_{k,j} \leq P_{i,j}} \beta P_{k,j} - \beta N_o$  olarak kullanılmıştır. (3.13) ve (3.14)'te,  $r(f), f \in \mathcal{F}$  oturumunun veri hızıdır.  $r_{i,j}$  ve  $r_{k,i}$ ,  $i$ 'den  $j$ 'ye ve  $k$ 'dan  $i$ 'ye olan iletimlerin hız miktarıdır. (3.15), ara düğümlerdeki akış dengesini belirtmektedir. (3.16),  $i$ 'den  $j$ 'ye olan iletim için elde edilebilir bağ hızının, iletimin toplam akış hızı ile ilişkisini belirtmektedir. SIC kullanan optimal çözümde, (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12), (3.13), (3.14), (3.15) ve (3.16) kullanılmıştır. SIC kullanmayan optimal çözümde, (3.5), (3.6), (3.7), (3.13), (3.14), (3.15), (3.16) ve,

$$P_{i,j} - \sum_{k \neq i} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_o \geq (1 - x_{i,j}[t]) M_{i,j} \quad (j \in \mathcal{N}, i \in I_j, 1 \leq t \leq T) \quad (3.17)$$

amacı çözmek için kullanılmıştır. (3.17)'de,  $M_{i,j}, P_{i,j} - \sum_{k \neq i} \beta P_{k,j} \lambda_k[t] - \beta N_o$  ifadesine eşittir.

### 3.4 Benzetim Sonuçları

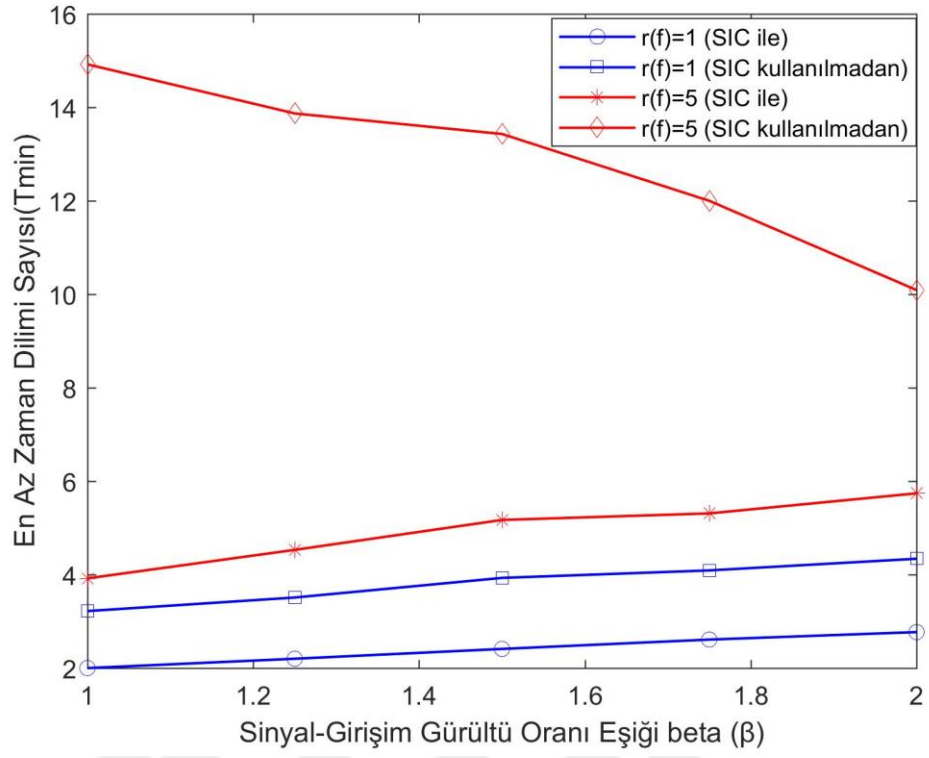
Benzetimler, sinyal-girişim gürültü oranı eşiği ( $\beta$ ) ve iletim gücü ( $P_t$ ) için yapılmıştır. İki parametre için de iki farklı akış hızı (ağır ve hafif akış) senaryolarında, algoritmaların performansları değerlendirilmiştir. Benzetim parametreleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Alıcı sinyal-girişim gürültü oranı eşiği ( $\beta$ )'nın değeri, 1-2 arasındadır; bu da düşük spektral verimliliğe denk gelmektedir. Bu durumun sebebi, düğüm yoğunluğunun düşük olması ve düğümler arası mesafenin fazla olmasıdır. İletim gücü ve gürültü değerleri bu eşiğin uygun olması için ayarlanmıştır. Gürültü ve iletim gücü birlikte azaltılabilir ya da artırılabilir ve bu durumlarda da problem matematiksel olarak aynı olacaktır. İki optimizasyon altyapısı karşılaştırılmıştır. Bunlar, farklı akış hızları  $r(f)=1$  ve  $r(f)=5$ ,  $f=1, \dots, F$  için AGÇ kullanan optimal çözüm ve AGÇ kullanmayan optimal çözümdür.  $F=3$  adet akış ve bir adet varış bulunmaktadır. Akışların ağırlıkları eşittir. Sonuçlar, 100 bağımsız denemeden elde edilmiştir.

Çizelge 3.1 : Benzetim parametreleri.

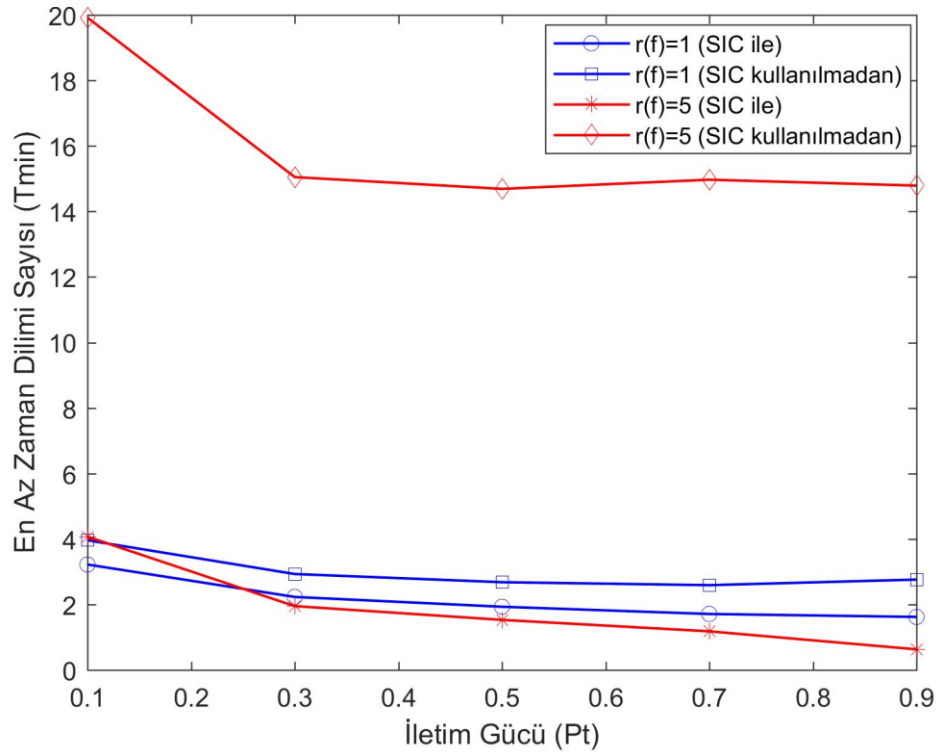
Parametre	Tanım	Değer
$N$	Düğüm sayısı	15
$D_{max}$	Ağ alanı yarıçapı	200 m
$\gamma$	Yolkaybı faktörü	2.5
$N_o$	Gürültü gücü	$10^{-5}$ W
$P_t$	Düğüm iletim gücü	0.1-1
$\beta$	Sinyal-girişim-artı-gürültü oranı eşiği	1-2
$T$	Zaman dilimi sayısı	50

Şekil 3.1’de, SIC kullanan ve kullanmayan optimal çözümlerde farklı akış hızlarında farklı  $\beta$  değerleri için elde edilen en az çerçeve uzunlukları gösterilmektedir.  $r(f)=5$  (ağır akış)’de, düşük  $\beta$  için SIC kullanarak daha fazla bağ çizelgelenebiliyor. Bu durumda, SIC ile performans, SIC’nin olmadığı durumdan daha iyidir (çerçeve uzunluğu çok daha az).  $\beta$  arttıkça, performansları birbirlerine yaklaşmaktadır. SIC kullanan  $r(f)=1$  durumları ve SIC kullanmayan  $r(f)=1$  durumunda,  $T_s$ ,  $\beta$ ’daki artış ve bir zaman diliminde çizelgelenemeyen iletimlerin sayısındaki artış sebebiyle biraz artmaktadır. Tüm akış hızları için SIC kullanan optimal çözüm, SIC kullanmayan optimal çözüme göre performans iyileşmesi göstermektedir. Bu iyileşme, özellikle  $\beta$  düşük değer aldığı ve ağ yükü fazla olduğunda yüksek olmaktadır.

Şekil 3.2’de, SIC kullanan ve kullanmayan optimal algoritmaları farklı akış hızlarında farklı  $P_t$  değerleri için elde edilen en az zaman dilimi sayıları gösterilmiştir. En yüksek sayıda zaman dilimi,  $r(f)=5$  ve SIC kullanmayan optimal algoritma ile elde edilmektedir. En düşük iletim gücü  $P_t=0.1$ ’de, en az zaman dilimi sayısı en yüksektir.  $P_t$ ,  $P_t=0.3$ ’e yaklaştıkça en az zaman dilimi sayısı azalmaktadır.  $P_t$ ’yi,  $P_t=0.3$ ’ten sonra arttırmak, zaman dilimi sayısında belirgin bir artış yapmamaktadır.  $r(f)=5$ ’te, SIC kullanan optimal algoritma, SIC kullanmayan optimal algoritma ile benzer performans göstermektedir.  $P_t$ ,  $P_t=0.3$ ’e ulaşana kadar en az zaman dilimi sayısı azalmaktadır.  $P_t=0.3$ ’ten sonra,  $P_t$  arttıkça en az zaman dilimi sayısında hafif azalma görülmektedir.



Şekil 3.1 : En az zaman dilimi sayısına karşı SINR.



Şekil 3.2 : En az zaman dilimi sayısına karşı iletim gücü.

$r(f)=1$ 'de, SIC kullanan optimal algoritma, SIC kullanmayan optimal algoritmaya göre %12.5 daha iyi performans göstermektedir.  $r(f)=5$ 'te, SIC kullanan optimal algoritma,  $r(f)=1$ 'deki algoritmalarından daha iyi performans göstermektedir. Bunun sebebi  $r(f)=5$  senaryosunda daha fazla sayıda sinyal olmasıdır. SIC ile daha fazla sinyal gruplanıp iletilebilir ve böylece daha az sayıda zaman dilimi kullanılır. Tüm akış hızları için, SIC kullanan algoritma SIC kullanmayan algoritmaya göre daha iyi performans göstermektedir. Çerçeve süresi arttıkça, bir çerçevede iletilebilecek bit sayısı da artmaktadır. Hız hesaplandığında, bir çerçevede iletilen bit sayısı çerçeve süresine bölünmektedir ve bu durum iletim hızını azaltmaktadır.  $P_t$  arttıkça,  $T_s$ ,  $P_t=0.3$ 'ten sonra belirgin bir şekilde değişmemektedir. Düğümler aynı anda iletim yaptıkları için,  $P_t$  arttıkça, sinyal-girişim gürültü formülündeki gürültü ihmal edilebilir. Sistem girişimle-sınırlı duruma gelir ve  $P_t$  arttıkça sinyal-girişim gürültü oranı artmaz. Bu senaryoda  $P_t$ 'yi  $P_t=0.3$ 'ten daha yüksek bir değere çıkarmak gerekmemektedir.



## 4. DİK OLMAYAN ÇOKLU ERİŞİM TABANLI KABLOSUZ AĞLARDA BİRLEŞİK YÖNLENDİRME VE ÇİZELGELEME

### 4.1 Giriş

Bir ağda bulunan kullanıcı sayısı arttıkça, kablosuz ağın sağlaması gereken kaynaklar ve hizmetlerin de artması gerekir; bu durum kablosuz iletişimde veri kullanımını hızla arttırmaktadır [47]. Yüksek sistem çıktısı ve düşük gecikmeli iletimlerin elde edilmesi gereksinim haline gelmiştir. Frekans spektrumunun sınırlı ve pahalı bir kaynak olması sebebiyle, kablosuz ağ hizmetlerine artan talebi karşılayabilmek için günümüz kablosuz haberleşme ağları mümkün olduğu kadar verimli çalışmalıdır [47]. Bu amaçla, kablosuz sistemlerin araştırılması ve tasarımında matematiksel optimizasyon yöntemlerinin uygulanması büyük önem kazanmıştır [47].

Kablosuz tasarsız ağlar, kullanıcılar arasında iletişimin, sabit olmayan bir altyapıya ortak kablosuz bir kanal üzerinden yapıldığı çok atlamalı ağlardır. Kablosuz tasarsız ağların en başlıca özelliklerinden birisi kullanıcı merkezli yayın yapılmasıdır. Bu şekilde kullanıcılar birbirleriyle birden fazla atlama yaparak iletişim kurabilmektedirler. Birbirlerinin iletişim kapsama alanında bulunan kullanıcı çiftleri arasında iletişim bağı bulunmaktadır [48]. İletişim kapsama alanı dışında olan kullanıcı çiftleri için birden fazla atlama kullanılarak bağlantı oluşturulur. Kablosuz tasarsız ağlarda çalışılan konulardan biri, kullanıcı çizelgelemedir. Bağ çizelgeleme algoritmalarında, bir kullanıcı sadece başka bir kullanıcıya iletim yapabilir ya da sadece başka bir kullanıcıdan iletim alabilir. Alıcıya gelen diğer tüm iletimler girişim kabul edilir [1]. İletimler aynı zamanda alındığında, bağ çakışması olur ve sinyal alınması başarısız olur [1]. Zamanda ve uzayda çakışmaların olmamasını sağlayan çizelgeleme algoritmaları, kablosuz tasarsız ağların kapasitesini sınırlayan algoritmalar [1]. Yönlendirme de kablosuz tasarsız ağlarda çalışılan konulardan biridir. İletişim kapsama alanı dışındaki kullanıcılar için en yüksek çıktıyı sağlayacak yolu bulmak için yönlendirme gereklidir.

Bu çalışmada, kablosuz ağlarda sistem çıktısı optimizasyonu için çizelgeleme ve çok-yollu yönlendirme çalışılmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, modelimiz,

iletici düğümlerin güç alanında Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access- NOMA) ile çoklama yapmakta ve de alıcılarda Ardışık Girişim Çıkarımı (Successive Interference Cancellation- SIC) kullanarak iletimlerin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Düğümlerin iletim güçlerinin sabit olduğunu varsayıyoruz. NOMA (bir iletici ve iki alıcı) ya da SIC (iki iletici ve bir alıcı) uygulayabilen üç düğümlü birleşik bağlara ek olarak tek bağlar (bir iletici ve bir alıcı) oluşturuyoruz. Bağlar, uçtan uca akış hızlarının ağırlıklı toplamının optimizasyonu için zamanda çakışmayacak şekilde çizelgelenmiştir. Problem, bir karışık-tam sayı doğrusal programı olarak formülleştirilmiştir. Performanstaki gelişme, NOMA ve SIC eklenerek test edilmiştir.

## 4.2 Sistem Modeli

$N$  adet kullanıcı rasgele ve eşit dağılımlı olarak konumlanmıştır. Belirli sayıda iletişim oturumları çok-atlamalı ve çok-yollu olarak yönlendirilmiştir. Zaman dilimlere ayrılmış ve her dilimde belirli sayıda bağ iletim yapmak için çizelgelenmiştir. Kullanıcı konumlarının ve kanal kazançlarının sabit olduğu varsayılmaktadır. Her kullanıcının sabit  $P$  iletim gücü vardır.  $g_{ij} = d_{ij}^{-\gamma}$ ,  $i$  ve  $j$  kullanıcıları arasındaki kanal kazancıdır.  $d_{ij}$ ,  $i$  ve  $j$  kullanıcıları arasındaki mesafedir.  $\sigma^2$ , toplanır beyaz Gauss gürültüsü gücüdür. Bir iletim, eğer sinyal-girişim gürültü oranı  $\beta$ 'dan büyükse başarılıdır. Sonuç olarak, hız  $R = \log_2 \beta$  bps/Hz elde edilmektedir. Kablosuz haberleşmede çizelgeleme yapıldığında, her kullanıcının ya sinyal iletmesine ya da sinyal almasına izin verilir.

### 4.2.1 SIC tabanlı iletim

[8]'deki çalışma, SIC'yi kullanmıştır. SIC, aynı anda yapılan birden fazla iletimin alınmasını ve sistem çıktısının iyileştirilmesini sağlamaktadır. SIC'de, bir alıcı aldığı sinyalleri önce çözüp, çözdüklerini toplam sinyalden çıkarıp, güçlü girişimi eler ve sonra daha zayıf sinyalleri çözer. Başlangıç sinyal-girişim gürültü oranı  $\beta$ 'dan düşük bile olsa, bu eşik SIC uygulanarak aşılabılır. Kullanıcı  $i$  ve  $j$ 'nin aynı anda alıcı  $k$ 'ya iletim yaptıklarını varsayalım. Genelliği kaybetmeden, kanalların  $g_{ik} \geq g_{jk}$  olarak sıralandığını varsayalım. Alıcı  $k$ , önce kullanıcı  $i$ 'nin mesajını çözer ve  $i$ 'nin sinyalini

gürültü kabul eder. Sinyal-girişim gürültü oranı  $\frac{Pg_{ik}}{Pg_{jk}+\sigma^2}$  olur. Eğer  $\frac{Pg_{ik}}{Pg_{jk}+\sigma^2} \geq \beta$  ise, kullanıcı  $i$ 'den gelen sinyal başarılı bir şekilde çözülür ve toplam sinyalden çıkarılır. Alıcı  $k$ , iletilen  $j$ 'nin sinyalini, sinyal-girişim gürültü oranı  $\frac{Pg_{jk}}{\sigma^2}$  ile çözer. Eğer bu oran  $\beta$ 'dan büyükse, kullanıcı  $k$  başarıyla mesajı çözerek iletimi sonlandırır.

#### 4.2.2 NOMA tabanlı iletim

Bu çalışmada, kullanıcıların NOMA kullanabildiği varsayılmaktadır. Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access- NOMA)'da bir kullanıcı aynı anda birden fazla kullanıcıya iletim yapabilir. Bir iletilen, iletim gücünü birden fazla iletim için paylaşır. Yüksek kazançlı bağlar daha düşük güç alır. İletilecek sinyaller toplanıp birlikte iletilirler. Alıcılarda alınan her sinyal azalan iletim gücü sırasına göre çözülür ve elenir. En son kendi sinyalini çözer.

Kullanıcı  $i$ 'nin aynı anda alıcı  $j$  ve  $k$ 'ya iletim yaptığını varsayalım.  $P_{ij}$  ve  $P_{ik}$ ,  $j$  ve  $k$  alıcıları için atanmış iletim güçleridir. Genelliği kaybetmeden, kanalların  $g_{ij} \geq g_{ik}$  olarak sıralandığını varsayalım. Girişim elemesi kanal kazançlarına bakılarak yapılır ve iletim gücü  $P_{ij} \leq P_{ik}$  olarak atanır. Alıcı  $k$  önce  $j$  kullanıcı için sinyalini çözer ve sinyalini gürültü kabul eder. Sinyal-girişim gürültü oranı  $\frac{P_{ij}g_{ik}}{g_{ik}P_{ik}+\sigma^2}$  olur. Eğer  $\frac{P_{ij}g_{ik}}{g_{ik}P_{ik}+\sigma^2} \geq \beta$  olursa kullanıcı  $j$ 'nin mesajı başarıyla çözülür ve toplam sinyalden çıkarılır.

$k$  kullanıcı kendi sinyalini sinyal-girişim gürültü oranı  $\frac{P_{ik}g_{ik}}{\sigma^2}$  ile çözer. Bu oran  $\beta$ 'dan büyükse kullanıcı  $k$  başarıyla mesajını çözer. Aynı zamanda, kullanıcı  $j$  kullanıcı  $k$ 'nın sinyalini gürültü kabul eder ve sinyalin sinyal-girişim gürültü oranı  $\frac{P_{ij}g_{ij}}{g_{ij}P_{ik}+\sigma^2}$  olur. Bu oran  $\beta$ 'dan büyükse kullanıcı  $j$ , başarıyla sinyalini çözer ve iletim tamamlanır.

Bu çalışmada, basitleştirmek için NOMA (SIC) tabanlı iletimde iki alıcı (iletilen) ve tek bir iletilen (alıcı) olduğunu varsaymaktayız.

### 4.2.3 Birleşik bağlar

[8]'de SIC kullanan alıcıların olduğu ve ileticilerin sabit güce sahip oldukları varsayılmıştır. Böylece, çizelgelemede sinyal-girişim gürültü kısıtları sadece ikili karar değişkenlerine göre yazılabilir. Yukarıda açıklandığı gibi iletim gücü NOMA için sabit olarak alınamaz. NOMA'da, bir ileticinin toplam gücü alıcılar arasında paylaşılmalıdır. Bu durum, problemi daha da karmaşıklaştırmaktadır. Bu çalışmada, farklı bir yol seçiyoruz. Önce NOMA ve SIC birleşik bağ kümelerini belirliyoruz. Her birleşik bağ üç kullanıcıdan oluşmaktadır. Yukarıda anlatılan durumda, bir NOMA bağı  $(i, j, k)$  eğer aşağıdaki kısıtları sağlayacak  $P_{ij}$  ve  $P_{ik}$  varsa uygundur,

$$P_{ik} \geq \frac{\beta\sigma^2}{g_{ik}} \quad (4.1)$$

$$P_{ij} \geq \beta P_{ik} + \frac{\beta\sigma^2}{g_{ik}} \quad (4.2)$$

$$P_{ij} + P_{ik} \leq P \quad (4.3)$$

Birleşik bir SIC bağı  $(i, j, k)$  aşağıdaki ifadeler kanal kazançları tarafından sağlanıyorsa uygundur,

$$\frac{Pg_{ik}}{\sigma^2} \geq \beta \quad (4.4)$$

$$\frac{Pg_{ik}}{Pg_{jk} + \sigma^2} \geq \beta \quad (4.5)$$

$\mathcal{L}$ , tek bağları da içeren birleşik bağ kümesidir.

### 4.2.4 Çelişkiler

Herhangi iki bağ (birleşik NOMA/SIC veya tek) aşağıdaki kriterleri sağlıyorsa çelişmezdir:

- Ortak kullanıcıları olmamalı
- Birbirlerinden yeterince uzak olmalılar

Birinci durum açıktır. İkinci durum, belirgin girişimden kaçınmak için eklenmiştir. Burada koruma mesafesi  $\Gamma > 1$  tanımlamaktayız. İki adet NOMA bağı  $(i, j, k)$  ve  $(x, y, z)$  olduğunu varsayalım. Aşağıdaki durumların sağlanması gerekmektedir,

- 1)  $d_{iy} > \Gamma \times d_{xy}$  ve  $d_{iz} > \Gamma \times d_{xz}$
- 2)  $d_{xj} > \Gamma \times d_{ij}$  ve  $d_{xk} > \Gamma \times d_{ik}$

Buna göre iki birleşik bağı beraber çizelgelemek için, herhangi bir birleşik bağın ileticisinden herhangi ikinci bir bağı alıcısına olan mesafe, ikinci birleşik bağına bağ mesafelerinden bir miktar fark ile daha fazla olmalıdır. Eğer koruma mesafesi artırılırsa (azaltılırsa), daha az (daha fazla) birleşik bağı bir zaman dilimine çizelgelenebilir. Koruma mesafesi kavramı bağlar arasındaki girişimi hesaba katmak için kullanılan basit bir kavramdır. Girişimin formülleştirilmesi gelecek çalışmalarda yapılacaktır. Normalde, eğer yukarıda bahsedilen mesafe çok yakınsa, girişim çıkarımı iki birleşik bağı bir arada olabileceği şekilde yapılabilir.

### 4.3 Problemin Formülleştirilmesi

$a_{l,l'}$ ,  $l, l' \in \mathcal{L}_c$ , çelişmeme matrisi, eğer birleşik bağlar  $l$  ve  $l'$  çelişmiyorsa  $a_{l,l'}=1$  olur.  $b_{i,j,l}$ ,  $(i,j)$  bağıyla  $l$  birleşik bağı arasındaki ilişkiyi tanımlayan matristir. Eğer birleşik bağı  $l$ ,  $(i,j)$  bağına içeriyorsa,  $b_{i,j,l}=1$  olur. Örnek olarak, birleşik NOMA bağı  $(i, j, k)$  ya da tek bağı  $(i, j)$ ,  $(i, j)$  bağına içermektedir. Karar değişkenleri şu şekildedir. İkili değişken  $y = y_l[t]$ ,  $l \in \mathcal{L}$ ,  $t = 1, \dots, T$ , eğer birleşik bağı  $l$ ,  $t$  zaman diliminde çizelgelenmişse 1 değerini alır. Eğer  $(i, j)$  bağı  $((i, j)$  bağına içeren herhangi bir birleşik bağı),  $t$  zaman diliminde çizelgelenmişse, ikili değişken  $x_{i,j}[t]$ , 1 değerini alır. Sürekli negatif olmayan değişken  $r_f$ ,  $f \in \mathcal{F}$  akışının desteklenen hızıdır.  $\mathcal{F}$ , ağdaki akışların kümesidir.

Birleşik yönlendirme ve bağı çizelgelenmesi optimizasyonu probleminin tanımlaması,

$$\max_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \left\{ \sum_{f \in \mathcal{F}} w_f r_f \right\} \quad (4.6)$$

Kısıtları,

$$y_l[t] + y_{l'}[t] \leq a_{l,l'} + 1, \forall l, l' \in \mathcal{L}_c, \forall t = 1, \dots, T \quad (4.7)$$

$$\sum_{j \neq i} r_{i,j,f} = r_f, \forall f \in \mathcal{F}, i = s_f \quad (4.8)$$

$$\sum_{i \neq j} r_{i,j,f} = r_f, \forall f \in \mathcal{F}, j = d_f \quad (4.9)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{N}/i} r_{k,i,f} = \sum_{j \in \mathcal{N}/i} r_{i,j,f}, \forall f \in \mathcal{F}, \forall i \in \mathcal{N} / \{s_f, d_f\} \quad (4.10)$$

$$x_{i,j}[t] = \sum_{l \in \mathcal{L}_c} y_l[t] b_{i,j,l} \quad (4.11)$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} r_{i,j,f} \leq \frac{R}{T} \sum_{t=1}^T x_{i,j}[t], \forall i \neq j \in \mathcal{N} \quad (4.12)$$

$$r_{i,j,f} \geq 0, \forall i, j \in \mathcal{N}, f \in \mathcal{F} \quad (4.13)$$

$$x_{i,j}[t], y_l[t] \in \{0, 1\}, \forall i, j \in \mathcal{N}, t = 1, \dots, T, l \in \mathcal{L}_c \quad (4.14)$$

(4.6)'daki ifade, oturumların akışlarının ağırlıklı toplam hızının optimizasyonu amacıdır.  $w_f, f \in \mathcal{F}$ , parametresi,  $f$  akışının ağırlığını (önemini) ifade eder. (4.7), iki çelişen birleşik bağın aynı zaman diliminde çizelgelenemeyeceğini belirtmektedir. (4.8), (4.9) ve (4.10), her akış için kaynak, varış ve ara düğümlerin akış dengesi denklemleridir. (4.11)'de,  $(i, j)$  bağı, eğer  $(i, j)$  bağına içeren herhangi bir birleşik bağ çizelgelendiye çizelgelenmiş kabul edilir. (4.12)'de, bir bağdan geçen toplam akış hızının o bağın çizelgelenme sayısının  $R/T$  ile çarpımından daha fazla olamayacağını ifade etmektedir. Son olarak, (4.13) ve (4.14) numaralı kısıtlar,  $x_{i,j}[t], y_l[t]$  değişkenlerinin ikili olma durumunu ve akışların negatif olmamalarını sağlamaktadır.

Amaç ve tüm kısıtlar karar değişkenlerinde doğrusaldır. Dolayısıyla, problem karışık tamsayı-doğrusal programlama (mixed integer linear programming (MILP)) problemidir. CPLEX gibi standart bir çözücüyle çözülebilir.

#### 4.4 Benzetim Sonuçları

$N=20$  düğüm içeren bir topoloji için benzetimler yapılmıştır. Benzetim parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Benzetim parametreleri.

Parametre	Tanım	Değer
$N$	Kullanıcı sayısı	20
$F$	Akış sayısı	3
$W$	Akış ağırlıkları	[5,5,5]
$T$	Zaman dilimi sayısı	10
$D_{max}$	Ağ alanı yarıçapı	100 metre
$\gamma$	Yol kaybı faktörü	3
$\sigma^2$	AWGN gürültü gücü	$10^{-6}$ W
$P$	Kullanıcı iletim gücü	1 W
$\beta$	Sinyal-gürültü oranı eşiği	1
$R$	Çizelgelenmiş bağ hızı	1 bps/Hz
$\Gamma$	Koruma parametresi	1.5 ve 2

İlk benzetimlerde üçer akış bulunmaktadır. Kaynak düğümler 1,2,3 ve varış düğümleri 18,19,20’dir. Örnek bir topoloji Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Kaynakları ve bu kaynaklara denk gelen varış düğümleri dairesel bir alanın kenarlarına en fazla mesafe olacak şekilde çok atlamalı yönlendirmenin gerçekleşmesi için konmuştur. Çizelge 4.2’de 10 farklı rasgele topoloji ve girişim koruma parametresi  $\Gamma = 1.5$  için sonuçları göstermektedir. NOMA veya SIC’nin kullanılması performansta belirgin bir değişiklik yapmamaktadır; fakat tek bağlarla karşılaştırıldığında, ağırlıklı toplam hızda 25-30% iyileşme sağlamaktadır.

Çizelge 4.2 : 10 farklı kullanıcı dağılımı ve üç farklı senaryo için performans. Koruma parametresi  $\Gamma = 1.5$ .

Deneme #	Mevcut Bağ Kümesi		
	Tek Bağlar	Tek + NOMA	Tek + SIC
1	3.5	4.5	4.5
2	4.0	4.5	4.5
3	3.5	5.0	5.0
4	4.0	4.5	4.5
5	4.0	4.5	4.5
6	3.5	4.5	4.0
7	4.0	5.0	5.0
8	3.5	5.0	5.0
9	3.5	4.5	4.0
10	3.0	4.0	4.0

Çizelge 4.3'te girişim koruma parametresi  $\Gamma = 1.5$ 'tan 2'ye arttırılmıştır. Bu durum, bağların birlikte çizelgelenmesini daha da zorlaştırmaktadır. Beklendiği üzere ağırlıklı toplam hız azalmaktadır. Sadece tek bağların kullanıldığı duruma göre ikisi de 25-30% iyileşme sağlamaktadır.

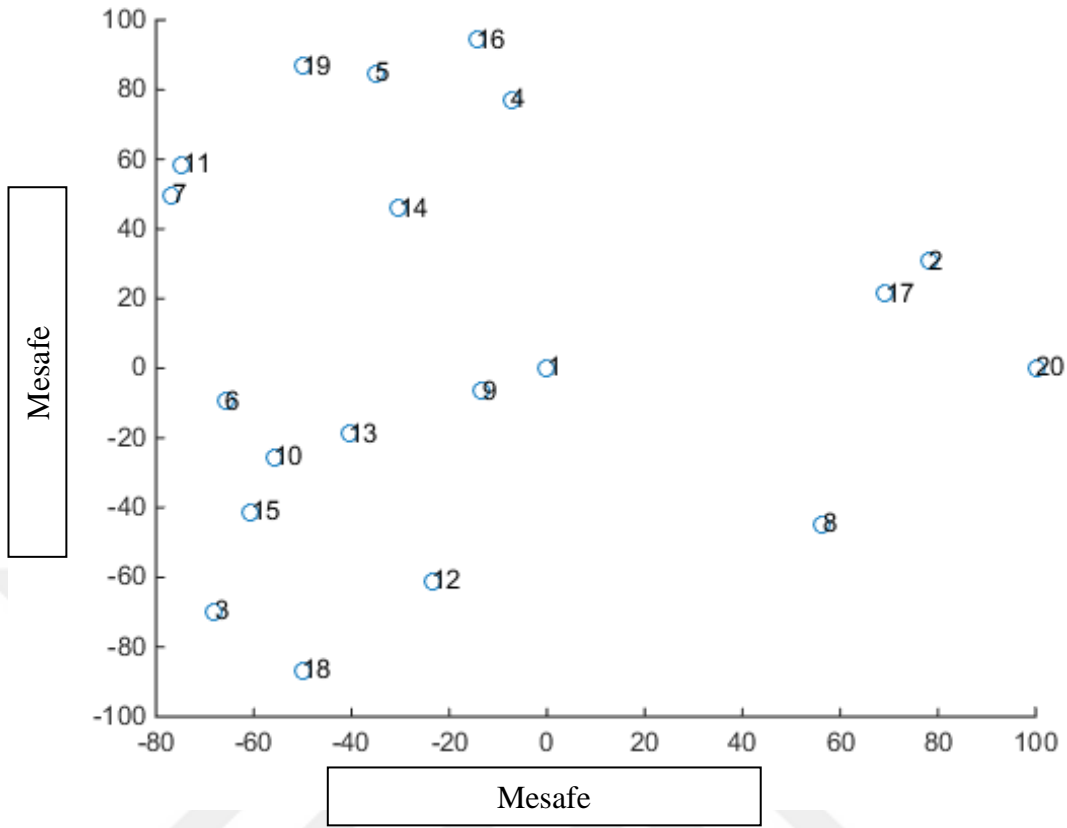
Çizelge 4.3 : 10 farklı kullanıcı dağılımı ve üç farklı senaryo için performans. Koruma parametresi  $\Gamma = 2$ .

Deneme #	Mevcut bağ kümesi		
	Tek Bağlar	Tek + NOMA	Tek + SIC
1	2.5	3.0	3.0
2	2.5	3.5	3.5
3	2.5	3.5	3.5
4	2.5	3.5	3.5
5	2.5	3.5	3.0
6	2.5	3.5	3.5
7	2.5	3.5	3.5
8	3.0	3.5	3.0
9	2.5	3.0	3.0
10	2.5	3.0	3.5

#### 4.4.1 Merkezde Tek Kaynak

Bu kısımda, NOMA'nın belirgin iyileşme gösterdiği bir durumdan bahsedilmektedir. 3 tane akış bulunmaktadır; fakat tüm akışların kaynağı 1 numaralı düğümdür ve bu düğüm merkezde bulunmaktadır. Akışların varış düğümleri (18,19,20) dairesel alanın kenarında 120 derece aralıkta konumlanmıştır. Bu durum, baz istasyonunun düğümlere bilgi dağıtımını yaptığını göstermektedir. Örnek bir topoloji Şekil 1'de verilmiştir. Bilgi merkezden kenarlara doğru yayıldıkça pek çok NOMA fırsatı olduğu görülmektedir. Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere NOMA tabanlı durumda ağırlıklı toplam hız belirgin bir şekilde artmaktadır (65-70%). SIC bağlarını kullanmak iyileşme sağlamamaktadır.





Şekil 4.1: Tüm akışların kaynağı merkezde ve varış düğümleri kenarda.

Çizelge : 4.4 Merkezde tek kaynak. 10 farklı kullanıcı dağılımı ve üç farklı senaryo için performans. Girişim koruma parametresi  $\Gamma = 1.5$ .

Deneme #	Mevcut bağ kümesi		
	Tek bağlar	Tek + NOMA	Tek + SIC
1	5.0	8.5	5.0
2	5.0	8.5	5.0
3	5.0	8.5	5.0
4	5.0	7.5	5.0
5	5.0	8.5	5.0
6	5.0	8.0	5.0
7	5.0	8.0	5.0
8	5.0	8.5	5.0
9	5.0	8.5	5.0
10	5.0	9.0	5.0

Şekil 4.1'deki topoloji için, Çizelge 4.5 her zaman diliminde çizelgelenmiş tek ve NOMA bağlarını göstermektedir. Sonuçlar, pek çok NOMA fırsatının kullanıldığını ve 2,4,5,8,9,10,11,12,14,15,17 düğümlerinin ara düğümler olarak kullanıldığı görülmektedir. Tek bağlar için sonuçlar verilmemiştir ancak bu durumda

2,4,5,7,8,10,12,14,15 düğümleri ara düğüm olarak kullanılmıştır (7 ve 9 kullanılmamıştır).

Çizelge 4.5 : Tüm akışların kaynağının 1 numaralı düğüm olduğu 3-akışlı bir ağda çizelgelenmiş birleşik bağlar.

Zaman dilimi	Çizelgelenmiş bağlar
1	(11,19), (15,18), (1,9,2)
2	(14,19), (9,10,18), (17,2,20)
3	(1,12,8), (4,5,19)
4	(1,17), (5,19), (10,18)
5	(8,20), (12,18), (1,14,4)
6	(2,20), (1,12,15), (4,16,19)
7	(3,18), (14,19), (1,9,8)
8	(8,20), (12,18), (1,14,4)
9	(8,20), (12,18), (14,4)
10	(14,11), (1,12,8)

## 5. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında ardışık girişim iptali (SIC) ve dik olmayan çoklu erişim (NOMA) kapasitesine sahip düğümlerden oluşan kablosuz bir ağda optimizasyon ve öğrenme yöntemleri kullanarak çizelgeleme ve yol atama problemleri çözülmüştür.

İlk kısımda Q-öğrenme kullanarak çizelgeleme problemi incelenmiştir. Q-öğrenme kullanarak Q-öğrenmenin en önemli sınırlaması ayrık ve sonlu eylem ve durum uzayı için uygun olmasıdır. Senaryomuzda, bir düğümün komşuları ve zaman dilimleri ayrık ve sonlu kümeler olduğu için Q-öğrenmenin kullanılması uygundur. Bir diğer sınırlama karmaşıklığıdır. Q-tablosundaki değerlere bakmak, komşu sayısı ve bir çerçevedeki zaman dilimi sayısı ile doğrusal olarak artmaktadır [25]. Buna ek olarak, düğüm sayısı arttıkça, özellikle başlangıç döngülerinde çarpışmaların artmasıyla algoritma lokal optimum bir değerde kalıp kaynakların iyi kullanılmamasına neden olabilir. Q-öğrenmenin en önemli avantajı minimal geribildirim gerektirmesi, düğümler arasında koordinasyon gerektirmemesi, ağ ve kanal modeli ile ilgili ön bilgiye ihtiyaç olmamasıdır. Gerekli olan tek geribildirim, iletimin başarılı olup olmadığına dair bilgidir. Buna ek olarak, algoritma kendisi deneyimleyerek ve çalışırken o anda öğrenmektedir. Grafik 2.3'te görüldüğü üzere algoritma yakınsamaya başlamamışken bile yüksek sayıda paket iletebilmektedir.

İkinci kısımda, SIC kullanan kablosuz tasarsız bir ağda en az sürede yönlendirme çizelgeleme eniyilemesi çalışmasında, eniyileme algoritmaları, SIC kullanıldığında ve kullanılmadığında, yönlendirme çizelgeleme hızı için gereken en az zaman dilimi sayısını bulmaktadır. Algoritmaların performansları farklı akış hızları için karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, SIC kullanan optimal algoritma, SIC kullanmayan optimal algoritmaya göre hem farklı iletim gücü hem de farklı SINR eşik değerleri için daha iyi başarımlar göstermiştir.

Kablosuz bir ağda bağların çizelgelenmesi incelendiği son kısımda çok-atlamalı ve çok-yollu yönlendirme kullanılmıştır. Daha fazla sayıda aynı anda yapılabilen iletimleri çizelgelemek için iletilerde NOMA, alıcılarda ise SIC kullanılmıştır.

NOMA tabanlı 3-düğümlü birleşik (kompozit) bağlar tanımlanarak birleşik bağ çizelgelemesi ve yol atama problemi karışık tamsayı doğrusal program olarak çözülmüştür. NOMA kullanımının başarımı 25-30% iyileştirdiği görülmüştür. Kaynağı merkezde varış düğümleri kenarda olan bir ağda 65-70% performans kazancı elde edilmiştir. Bu durum için ileticilerde de NOMA ve alıcılarda SIC kullanımı, sadece alıcılarda SIC kullanımından belirgin bir şekilde daha iyi başarımlar sağlamıştır.

Yeni nesil kablosuz iletişimde çoklu anten yapıları kullanılmaktadır. Bu sayede hem sinyal odaklanarak alıcıdaki sinyal gücü artırılmaktadır, hem de sinyal sadece istenen yöne odaklanarak girişim azaltılmaktadır. Gelecekte yapılabilecek çalışmalardan biri, bu tezdeki eniyileme problemine çoklu anten ve hüzme oluşturmanın eklenmesidir. Uzamsal çoklama teknikleri sayesinde, güç paylaşımalı NOMA tekniklerinin kullanımına gerek kalmayabilir.

Kablosuz ağlarda enerji verimliliği çok önemlidir. Düğümler mümkün olduğu kadar düşük güçle ve uzun sürede iletim yaparak ağ ömrünü artırabilirler. Gelecek çalışmalarda güç denetimi ve ağ ömrü optimizasyonu konusu çalışılabilir. Bu problem, bir Nesnelerin İnterneti (IoT) senaryosu dikkate alınarak ele alınabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Kontik M., Coleri Ergen S.,** (2015). Scheduling in successive interference cancellation based wireless ad hoc networks, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 9, pp. 1524-1527.
- [2] **lv S., Zhuang W., Wang X., Zhou X.,** (2011). Scheduling in wireless ad hoc networks with successive interference cancellation, *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1287-1295.
- [3] **Benvenuto N., Carnevale G., Tomasin S.,** (2005). Optimum power control and ordering in SIC receivers for uplink CDMA systems, *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 2333-2337.
- [4] **Manglayev T., Kizilirmak R. C., Kho Y. H., Bazhayev N., Lebedev I.,** (2017). NOMA with imperfect SIC implementation, *Proc. 17th Int. Conf. Smart Technol.*, pp. 22-25.
- [5] **Zhang D., Liu Y., Dai L., Bashir A. K., Nallanathan A., Shim B.,** (2019). Performance analysis of FD-NOMA-based decentralized V2X systems, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 7, pp. 5024-5036.
- [6] **Shi L., Shi Y., Ye Y., Wei Z., Han J.,** (2013). An efficient interference management framework for multi-hop wireless networks, *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, pp. 1434-1439.
- [7] **Qu L., He J., Assi C.,** (2014). Understanding the benefits of successive interference cancellation in multi-rate multi-hop wireless networks, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 7, pp. 2465-2477.
- [8] **Jiang C., Shi Y., Qin X., Yuan X., Hou Y. T., Lou W., et al.,** (2016). Cross-layer optimization for multi-hop wireless networks with successive interference cancellation, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 8, pp. 5819-5831.
- [9] **He Q., Yuan D., Ephremides A.,** (2017). Maximum link activation with cooperative transmission and interference cancellation in wireless networks, *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 16, no. 2, pp. 408-421.
- [10] **Jiang C., Shi Y., Hou Y. T., Lou W., Kompella S., Midkiff S. F.,** (2012). Squeezing the most out of interference: An optimization framework for joint interference exploitation and avoidance, *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 424-432.
- [11] **Shi L., Hu Y., Xu J., Shi Y., Ding X.,** (2019). The mobile base station strategy for wireless networks with successive interference cancellation, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 88570-88578.
- [12] **Li C., Xu Y., Xu Y., Diao B., An Z.,** (2019). Mlops: A sic-based minimum frame length with optimized power scheduling for Uans, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 21133-21146.
- [13] **Liu J. S., Lin C. H. R., Tsai J.,** (2017). Delay and energy tradeoff in energy harvesting multi-hop wireless networks with inter-session network coding and successive interference cancellation, *IEEE Access*, vol. 5, pp. 544-564.

- [14] **Simeone O.**, (2018). A very brief introduction to machine learning with applications to communication systems, *IEEE Trans. Cognit. Commun. Netw.*, vol. 4, no. 4, pp. 648-664.
- [15] **Choudhary R., Gianey H. K.**, (2017). Comprehensive review on supervised machine learning algorithms, *Proc. Int. Conf. Mach. Learn. Data Sci. (MLDS)*, pp. 37-43.
- [16] **Forster A.**, (2007). Machine learning techniques applied to wireless ad-hoc networks: Guide and survey, *Proc. 3rd Int. Conf. Intell. Sensors Sensor Netw. Inf.*, pp. 365-370.
- [17] **Li T., Zhao M., Wong K. K. L.**, (2020). Machine learning based code dissemination by selection of reliability mobile vehicles in 5G networks, *Comput. Commun.*, vol. 152, pp. 109-118.
- [18] **Chen M., Wang T., Ota K., Dong M., Zhao M., Liu A.**, (2020). Intelligent resource allocation management for vehicles network: An A3C learning approach, *Comput. Commun.*, vol. 151, pp. 485-494.
- [19] **Huang M., Zhang K., Zeng Z., Wang T., Liu Y.**, (2020). An AUV-assisted data gathering scheme based on clustering and matrix completion for smart ocean, *IEEE Internet Things J.*
- [20] **Alsheikh M. A., Lin S., Niyato D., Tan H. P.**, (2014). Machine learning in wireless sensor networks: Algorithms strategies and applications, *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 4, pp. 1996-2018, 4th Quart.
- [21] **Saravanan R., Sujatha P.**, (2018). A state of art techniques on machine learning algorithms: A perspective of supervised learning approaches in data classification, *Proc. 2nd Int. Conf. Intell. Comput. Control Syst. (ICICCS)*, pp. 945-949.
- [22] **Sutton R. S., Barto A. G.**, Reinforcement Learning: An Introduction, Cambridge, MA, USA:MIT Press, 2018.
- [23] **Kotsiantis S. B.**, (2007). Supervised machine learning: A review of classification techniques in Emerging Artificial Intelligence Applications in Computer Engineering, Amsterdam, The Netherlands:IOS Press, pp. 3-24.
- [24] **Watkins C. J. C. H., Dayan P.**, (1992). Q-learning, *Mach. Learn.*, vol. 8, no. 3, pp. 279-292.
- [25] **Yau K. L. A., Kwong K. H., Shen C.**, (2013). Reinforcement learning models for scheduling in wireless networks, *Frontiers Comput. Sci.*, vol. 7, no. 5, pp. 754-766.
- [26] **Bourenane M. Bourenane**, (2011). Adaptive scheduling in mobile ad hoc networks using reinforcement learning approach, *Proc. Int. Conf. Innov. Inf. Technol.*, pp. 392-397.
- [27] **Li K., Ni W., Abolhasan M., Tovar E.**, (2019). Reinforcement learning for scheduling wireless powered sensor communications, *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 3, no. 2, pp. 264-274.
- [28] **Niu J.**, (2010). Self-learning scheduling approach for wireless sensor network, *Proc. 2nd Int. Conf. Future Comput. Commun.*, pp. 253-257.
- [29] **Jacquelin A., Vilgelm M., Kellerer W.**, (2019). Grant-free access with multipacket reception: Analysis and reinforcement learning optimization, *Proc. 15th Annu. Conf. Wireless On-demand Netw. Syst. Services (WONS)*, pp. 83-90.

- [30] da Silva M. V., Souza R. D., Alves H., Abrao T., (2020). A NOMA-based Q-learning random access method for machine type communications, *IEEE Wireless Commun. Lett.*
- [31] Xiao L., Li Y., Dai C., Dai H., Poor H. V., (2018). Reinforcement learning-based NOMA power allocation in the presence of smart jamming, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 4, pp. 3377-3389.
- [32] Goldsmith A., *Wireless Communication*, New York, NY, USA:Cambridge Univ. Press, 2005.
- [33] Vermorel J., Mohri M., (2005). Multi-armed bandit algorithms and empirical evaluation, *Proc. 16th Eur. Conf. Mach. Learn. (ECML)*, pp. 437-448.
- [34] Low E. S., Ong P., Cheah K. C., (2019). Solving the optimal path planning of a mobile robot using improved q-learning, *Robot. Auton. Syst.*, vol. 115, pp.143-161[online]Available:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889018308285>
- [35] Tejaswini S., Nagarathna S., (2016). An efficient high-throughput routing with successive interference cancellation in wireless sensor networks, *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics Information Communication Technology (RTEICT)*, pp. 866-868.
- [36] Yuan D., Angelakis V., Lei L., (2012). Minimum-length scheduling in wireless networks with multi-user detection and interference cancellation: Optimization and performance evaluation, *2012 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, pp. 315-319.
- [37] Mete E., Girici T., (2020). Q-learning based scheduling with successive interference cancellation, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 172 034-172 042.
- [38] Pantelidou A., Ephremides A., (2008). Minimum schedule lengths with rate control in wireless networks, *MILCOM 2008 - 2008 IEEE Military Communications Conference*, pp. 1-7.
- [39] Sadi Y., Ergen S. C., (2014). Minimum length scheduling with packet traffic demands in wireless networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 7, pp. 3738-3751.
- [40] He Q., Angelakis V., Ephremides A., Yuan D., (2012). Revisiting minimum-length scheduling in wireless networks: An algorithmic framework, *2012 International Symposium on Information Theory and its Applications*, pp. 506-510.
- [41] Pantelidou A., Ephremides A., (2009). Minimum-length scheduling and rate control for time-varying wireless networks, *MILCOM 2009 - 2009 IEEE Military Communications Conference*, pp. 1-7.
- [42] Kompella S., Wieselthier J. E., Ephremides A., Sherali H. D., Nguyen G. D., (2010). On optimal sinr-based scheduling in multihop wireless networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 18, no. 6, pp. 1713-1724.
- [43] Chang J. H., Tassiulas L., (2004). Maximum lifetime routing in wireless sensor networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, no. 4, pp. 609-619.
- [44] Zhang M., Gong C., Feng Y., (2008). An energy-efficient algorithm for maximum lifetime and minimum routing in wireless sensor networks, *2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design*, vol. 1, pp. 507-510.

- [45] **Xing J., Zou X., Liu Z., Chen Y.**, (2006). Maximum lifetime routing of wireless sensor networks with base station assistance, *2006 International Conference on Communication Technology*, pp. 1-4.
- [46] **Muhamad W. N. W., Naim N. F., Hussin N., Wahab N., Aziz N. A., Sarnin S. S., et al.**, (2009). Maximizing network lifetime with energy efficient routing protocol for wireless sensor networks, *2009 Fifth International Conference on MEMS NANO and Smart Systems*, pp. 225-228.
- [47] **Guimaraes A., Guerreiro I., Sousa L., Maciel T., Cavalvante C.**, (2010). A (very) brief survey on optimization methods for wireless communications systems in, *7th International Telecommunications Symposium(ITS 2010)*.
- [48] **Li Z., Li B.**, (2006). Improving throughput in multihop wireless networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 3, pp. 762–773.
- [49] **Mitran P., Rosenberg C., Shabdanov S.**, (2011). Throughput optimization in wireless multihop networks with successive interference cancellation, in *Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, IEEE, 2011, pp. 1–7.
- [50] **Ding Z., Lei X., Karagiannidis G. K., Schober R., Yuan J., Bhargava V. K.**, (2017). A survey on non-orthogonal multiple access for 5g networks: Research challenges and future trends, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181–2195.
- [51] **Benjebbour A., Saito Y., Kishiyama Y., Li A., Harada A., Nakamura T.**, (2013). Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (noma) for future radio access, in *Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS)*, 2013 International Symposium on. IEEE, pp. 770–774.



