

**DOĞRUSAL ÇOK-SEKMELİ RÖLELİ KABLOSUZ AĞLAR
İÇİN DAĞITIK BİR ÇİZELGELEME YÖNTEMİ**

**A DISTRIBUTED SCHEDULING POLICY FOR LINEAR
MULTI-HOP WIRELESS RELAY NETWORKS**

MEHMET URCAN

Prof. Dr. MEHMET ŞAFAK
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2013

MEHMET URCAN'ın hazırladığı “**Doğrusal Çok-Sekmeli Röleli Kablosuz Ağlar İçin Dağıtık Bir Çizelgeleme Yöntemi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan
Prof. Dr. Yalçın TANIK

Danışman
Prof. Dr. Mehmet ŞAFAK

Üye
Prof. Dr. A. Salim KAYHAN

Üye
Doç. Dr. Elif UYSAL-BIYIKOĞLU

Üye
Doç Dr. Emre AKTAŞ

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof.Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

__/__/2013

Mehmet URCAN

ÖZET

DOĞRUSAL ÇOK-SEKMELİ RÖLELİ KABLOSUZ AĞLAR İÇİN DAĞITIK BİR ÇİZELGELEME YÖNTEMİ

MEHMET URCAN

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. MEHMET ŞAFAK

Temmuz 2013, 65 sayfa

Verici gücü, bant genişliği gibi kaynakların kısıtlı olması ve buna karşın veri akış hızı, iletişim kalitesi gibi kullanıcı ihtiyaçlarının giderek artması sonucu, kablosuz iletişim sistemlerinde işbirlikçi iletişimin önemi her geçen gün artmaktadır. En bilinen işbirlikçi iletişim yöntemlerinden biri kaynak ile hedef birim arasında konuşlandırılmış röle birimlerin kullanılması ile kaynak biriminin veri paketlerinin hedef birime ulaştırılmasıdır. Böylece sistemin kapsama alanı ve/veya kapasitesi arttırılabilir. Bu tez çalışmasında, herhangi bir zaman diliminde hangi birim veya birimlerin iletim yapacağını tanımlayan farklı çizelgeleme yöntemleri ele alınmıştır. Geleneksel ve merkezi çizelgeleme yöntemlerine değinilmiş, ayrıca verilen sisteme özgü olarak bir çeşit dağıtık çizelgeleme yöntemi tanımlanmıştır. Matlab ortamında oluşturulan benzetimler kullanılarak, her bir sekmenin birbirinden bağımsız olarak Rayleigh sönümlenmeye maruz kaldığı, Çöz-ve-İlet işbirliği stratejisinin ve BPSK kiplenim tipinin kullanıldığı ve her bir birimde paketleri geçici olarak saklamak için sonlu kapasitede bir tampon belleğin kullanıldığı çok sekmeli bir çizgisel röle ağında, bu çizelgeleme yöntemlerinin başarımları bit hata olasılığı, veri akış hızı, blok gecikme süresi, paket gecikme süresi, tampon bellek doluluğu gibi ölçütler ile karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Sekme sayısı, tampon bellek kapasitesi ve eşik SNR değerinin başarıma etkisi incelenmiştir. Ek olarak, BPSK kiplenim tipi yerine uyarlamalı kiplenim kullanıldığında, çizelgeleme yöntemlerinin başarımlarının nasıl değiştiği analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok-Sekmeli Kablosuz Ağlar, Röle Ağları, Doğrusal Ağlar, Çizelgeleme Yöntemleri, Çöz-ve-İlet, Tampon Bellek, Uyarlamalı Kiplenim, Rayleigh Sönümleme

ABSTRACT

A DISTRIBUTED SCHEDULING POLICY FOR LINEAR MULTI-HOP WIRELESS RELAY NETWORKS

MEHMET URCAN

**Master of Science, Department of Electrical Electronics
Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. MEHMET ŞAFAK

July 2013, 65 pages

Due to limited resources like transmit power and bandwidth on one hand and the increasing user demands like throughput and communication reliability on the other hand, the importance of cooperation becomes more obvious in wireless communication systems. One of the well-known cooperation methods is to carry data packets of the source node to the destination node via the relay nodes deployed between them. Therefore, the coverage area and/or the capacity of the system may be improved. This thesis addresses different scheduling methods so as to determine the nodes which are going to transmit for any time slot. In addition to conventional and centralized scheduling methods, a variation of distributed scheduling algorithms specific to the given system is investigated in a multi-hop linear relay network where every hop suffers independent Rayleigh fading, every node has a limited buffer capacity and uses Decode-and-Forward as the cooperation strategy and BPSK as the modulation scheme. Performances of these scheduling methods are evaluated regarding metrics such as bit error rate, throughput, block delay, packet delay and buffer occupancy. The system performance is determined as a function of number of hops, buffer capacity and threshold SNR value. For the evaluation of performances, simulations implemented on Matlab are used. Furthermore, performances of scheduling methods using adaptive modulation in addition to a single modulation scheme (BPSK) are analysed.

Keywords: Multi-Hop Wireless Networks, Relay Networks, Line Networks, Scheduling Methods, Decode-and-Forward, Buffer, Adaptive Modulation, Rayleigh Fading

TEŞEKKÜR

Bu çalıŐmaya bilgi ve tecrübeleri doğrultusunda ıŐık tutmasından ve çalışmanın neticelenmesi için beni daima cesaretlendirmesinden dolayı tez danıŐmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet Şafak'a,

Çalışmanın anlaşılabilirliğini artırıcı görüŐlerinden ve ileride yapılabilecek çalışmalar için verdikleri fikirlerden dolayı değerli jüri üyelerine,

Yüksek lisans eğitimim esnasında sağladığı elverişli koŐullardan dolayı ASELSAN'a,

Sağladığı maddi destek nedeniyle TURKCELL'e,

KoŐulsuz desteklerini her zaman hissettiğim anneme, babama ve kardeŐlerime,

İlgi ve desteklerinden dolayı okul ve iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
SÖZLÜK DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇİZELGELEME YÖNTEMLERİ	7
2.1 Sistem Modeli	7
2.2 Kanal Modeli.....	8
2.3 Çizelgeleme Yöntemleri.....	8
2.3.1 Geleneksel Çizelgeleme Yöntemi	8
2.3.2 Merkezi Çizelgeleme Yöntemi	9
2.3.3 Dağıtık Çizelgeleme Yöntemi.....	10
3. ÇİZELGELEME YÖNTEMLERİNİN BAŞARIMLARI	20
3.1 Sistemin Uçtan Uca Bit Hata Olasılığı Analizi	23
3.1.1 Sekme Sayısının Etkisi	26
3.1.2 Tampon Bellek Kapasitesinin Etkisi	29
3.1.3 Eşik SNR Değerinin Etkisi	31
3.2 Sistemin Ortalama ve Maksimum Paket Gecikme Süreleri Analizi	35
3.2.1 Sekme Sayısının Etkisi	36
3.2.2 Ortalama ve Eşik SNR Değerlerinin Etkisi	37
3.2.3 Tampon Bellek Kapasitesinin Etkisi	39
3.3 Tampon Bellek Kapasitesi Doluluk Analizi	42
3.3.1 Geleneksel Çizelgeleme	42
3.3.2 Merkezi Ve Dağıtık Çizelgeleme.....	43
4. UYARLAMALI KIPLenİMİN BAŞARIMA ETKİSİ	49
4.1 Sistemin Uçtan Uca Bit Hata Olasılığı Analizi	50
4.2 Sistemin Ortalama ve Maksimum Paket Gecikme Süreleri Analizi	55
5. SONUÇLAR.....	58

KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Röle Kullanarak Kapsama Alanının Genişletilmesi [17]	3
Şekil 2.1 Sistem Modeli	7
Şekil 2.2 Geleneksel Çizelgeleme Yöntemi	8
Şekil 2.3 Merkezi Çizelgeleme Yöntemi	9
Şekil 2.4 Kanal Kalitesi Kestirimi Aşaması	10
Şekil 2.5 Birimlerin Gruplandırılması	11
Şekil 2.6 Üç Birimden Oluşmuş Bir Grup	12
Şekil 2.7 Gönderim Yapacak Birim Tespiti Karar Ağacı	13
Şekil 2.8 Eşik Değeri Kontrolü Karar Ağacı	14
Şekil 2.9 Sağ (Sol) Sekme TB Durumu Karar Ağacı	14
Şekil 2.10 Koordinasyon Sinyalleri ve Birimlerin Durumlarına Etkileri	17
Şekil 3.1 AWGN Kanalda Farklı Kiplenim Tiplerinin Bit Hata Olasılıkları	25
Şekil 3.2 Sistemdeki Sekme Sayısının BER Başarımına Etkisi	27
Şekil 3.3 Sistemdeki Sekme Sayısının Düzgelenmiş Akış Hızı Başarımına Etkisi	28
Şekil 3.4 Bellek Kapasitesinin 8-Sekmeli Bir Sistemde BER Başarımına Etkisi ...	30
Şekil 3.5 Bellek Kapasitesinin 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Düzgelenmiş Akış Hızı Başarımına Etkisi	31
Şekil 3.6 Eşik SNR Değerinin 8-Sekmeli Bir Sistemdeki BER Başarımına Etkisi (TB=1 paket)	32
Şekil 3.7 Eşik SNR Değerinin 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Düzgelenmiş Akış Hızı Başarımına Etkisi (TB=1 Paket)	33
Şekil 3.8 Eşik SNR Değerinin 8-Sekmeli Bir Sistemdeki BER Başarımına Etkisi (TB=8 paket)	34
Şekil 3.9 Eşik SNR Değerinin 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Düzgelenmiş Akış Hızı Başarımına Etkisi (TB=8 Paket)	34
Şekil 3.10 Merkezi Yöntem İçin Paket Gecikme Süresi Histogramının Gaussian Dağılım(Ortalama=57, Standard Sapma= 11) İle Örtüşmesi (Sekme sayısı=8, Bellek Kapasitesi=2 paket).....	36
Şekil 3.11 Farklı Sekme Sayıları İçin Paket Gecikme Süresinin Olasılık Yoğunluk İşlevi	37
Şekil 3.12 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Farklı Ortalama SNR Değerleri İçin Paket Gecikme Süresinin Olasılık Yoğunluk İşlevi	39
Şekil 3.13 Farklı Tampon Bellek Kapasitelerine ve Farklı Ortalama SNR Değerlerine Bağlı Olarak 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Maksimum Paket Gecikmesi	40

Şekil 3.14 Farklı Tampon Bellek Kapasitelerine ve Farklı Eşik SNR Değerlerine Bağlı Olarak 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Maksimum Paket Gecikmesi...	40
Şekil 3.15 Farklı Tampon Bellek Kapasitelerine ve Farklı Ortalama SNR Değerlerine Bağlı Olarak 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Ortalama Paket Gecikmesi	41
Şekil 3.16 Farklı Tampon Bellek Kapasitelerine ve Farklı Eşik SNR Değerlerine Bağlı Olarak 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Ortalama Paket Gecikmesi	41
Şekil 3.17 Farklı Tampon Bellek Kapasitelerine Bağlı Olarak 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Maksimum ve Ortalama Paket Gecikmesi	42
Şekil 3.18 Merkezi Yöntemin Kullanıldığı 4-Sekmeli Bir Sistemde Sonsuz Kapasitede Tampon Bellek Kullanıldığında Röle Birimlerdeki Paket Sayısının Zamanla Değişimi.....	44
Şekil 3.19 Dağıtık Yöntemin Kullanıldığı 4-Sekmeli Bir Sistemde Sonsuz Kapasitede Tampon Bellek Kullanıldığında Röle Birimlerdeki Paket Sayısının Zamanla Değişimi (Ortalama SNR = 21 dB, eşik SNR = 3 dB)	45
Şekil 3.20 Dağıtık Yöntemin Kullanıldığı 4-Sekmeli Bir Sistemde 128 ve 256 Paketlik Kapasitede Tampon Bellek Kullanıldığında Röle Birimlerdeki Paket Sayısının Zamanla Değişimi (Ortalama SNR = 21 dB, eşik SNR = 3 dB).....	46
Şekil 3.21 Dağıtık Yöntemde Kaynağa Paketler Bernoulli Rassal Sürecine Göre Geldiğinde Birimlerdeki Paket Sayısının Zamanla Değişimi.....	48
Şekil 4.1 Uyarlamalı Merkezi Yöntemin BER Başarımı	52
Şekil 4.2 Uyarlamalı Merkezi Yöntemin Düzgelenmiş Akış Hızı Başarımı.....	53
Şekil 4.3 Uyarlamalı Dağıtık Yöntemin BER Başarımı	54
Şekil 4.4 Uyarlamalı Dağıtık Yöntemin Düzgelenmiş Akış Hızı Başarımı	55
Şekil 4.5 Uyarlamalı Merkezi ve Uyarlamalı Dağıtık Yöntemlerin Paket Gecikme Sürelerinin Olasılık Yoğunluk İşlevi (L=8, B=8)	56
Şekil 4.6 Uyarlamalı Merkezi ve Uyarlamalı Dağıtık Yöntemlerin Maksimum Paket Gecikmeleri (L=8).....	57
Şekil 4.7 Uyarlamalı Merkezi ve Uyarlamalı Dağıtık Yöntemlerin Ortalama Paket Gecikmeleri (L=8)	57

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 Birim Durumları	12
Tablo 2.2 Koordinasyon Sinyallerini Alan ve İleten Birimlerin Durum Geçişleri	15
Tablo 2.3 Tampon Bellek Kısıtı Olmadığı Durumda 8-Sekmeli Bir Sistemin Koordinasyon Sinyalleri Matrisi	18
Tablo 2.4 Farklı Sekme Sayıları İçin Düzgelenmiş Akış Hızları	19
Tablo 3.1 Kiplenim Tipi Seçimi İçin Kullanılan Eşik SNR Değerleri (BER=0.001)	26
Tablo 3.2 4-Sekmeli Bir Sistemin Röle Birimlerindeki Ortalama Bellek Dolulukları (Ortalama SNR = 21 dB, eşik SNR = 3 dB)	46

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ARQ	: Automatic Repeat Quest (Otomatik Tekrar İstemi)
AWGN	: Additive White Gaussian Noise (Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü)
BER	: Bit Error Rate (Bit Hata Olasılığı)
BPSK	: Binary Phase Shift Keying (İkili Evre Kaydırmalı Kiplenim)
CSI	: Channel State Information (Kanal Durum Bilgisi)
KDB	: Kanal Durum Bilgisi
pdf	: Probability Density Function (Olasılık Yoğunluk İşlevi)
QAM	: Quadrature Amplitude Modulation (Dördün Genlik Kiplenimi)
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying (Dörtlü Evre Kaydırmalı Kiplenim)
SNR	: Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
SS	: Sembol Süresi
TB	: Tampon Bellek
th	: Threshold (Eşik)
TS	: Time Slot (Zaman Dilimi)

SÖZLÜK DİZİNİ

Akış Hızı	: Throughput
Alıcı	: Receiver
Anahtarlamalı Hüzme Anteni	: Switched Beam Antenna
Ayrışmış	: Decoupled
Başarım	: Performance
Benzetim	: Simulation
Boş	: Idle
Çerçeve	: Frame
Çeşitlilik Kazancı	: Diversity Gain
Çizelgeleme	: Scheduling
Çöz-ve-İlet	: Decode-and-Forward
Değişinti	: Variance
Denkleştirme	: Equalization
Dizi	: Sequence
Duyarga	: Sensor
Düzgelemek	: Normalize
Enbüyütmek	: Maximize
Eşik	: Threshold
Eşzamanlı	: Simultaneous
Geleneksel	: Conventional
Girişim	: Inteference
Gönderici	: Transmitter
Iskalama Olasılığı	: Probability of miss-detection
İletim	: Transmission
İlinti	: Correlation

İşbirlikçi	: Cooperative
İzgesel verimlilik	: Spectral efficiency
Kanal Durum Bilgisi	: Channel State Information
Kararlı Hal	: Steady State
Karşılıklılık	: Reciprocity
Katar	: Stream
Kiplenim	: Modulation
Ödünleşim	: Trade off
Sekme	: Hop
Sıfır-Bir Kararıyla Birleştirme	: Hard Decision Combining
Sönümlenme	: Fading
Tampon Bellek	: Buffer
Tasarsız	: Ad-Hoc
Uyarlamalı	: Adaptive
Yanlış alarm olasılığı	: False alarm probability
Yarı Çift Yönlü	: Half duplex
Yayma Düzleminde İzotrop	: Omnidirectional
Yükselt-ve-İlet	: Amplify-and-Forward
Zaman Dilimi	: Time Slot

1. GİRİŞ

Günümüzde yüksek hızlarda ve servis kalitesi yüksek haberleşme sağlayacak kablosuz iletişim sistemlerine olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Araştırmacılar, verici gücü ve bant genişliği gibi kısıtlı kaynakları en verimli şekilde kullanarak geniş kapsama alanı, yüksek iletim kapasitesi ve kaliteli iletişim sağlama çabasındadırlar. Bu bağlamda son zamanlarda öne çıkan çözüm önerilerinden biri de işbirlikçi iletişimdir [1]-[4].

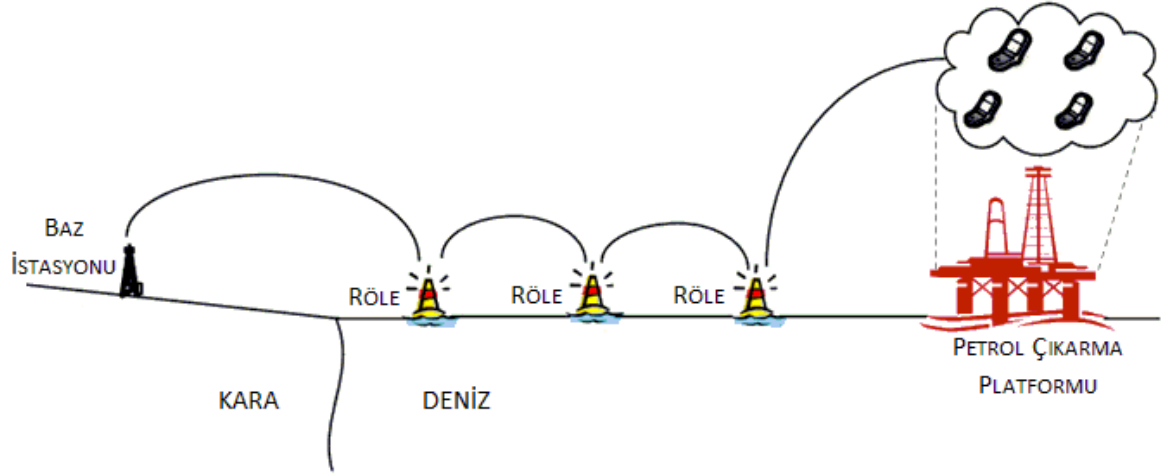
Kablosuz iletişim kanalları sönümlenmeye maruz kalmakta, iletişim sırasında alınan sinyal gücü seviyelerinde rastgele değişimler meydana gelmektedir. Bu yüzden alıcı tarafında gönderilen sinyali doğru çözümlenmek zorlaşmaktadır. Bunun üstesinden gelerek alıcının sinyali doğru çözümlenme olasılığını arttırmak için aynı sinyalin bağımsız sönümlenen kopyalarını uygun bir birleştirme yöntemi ile kullanılmasını sağlayan çeşitlilik yöntemleri geliştirilmiştir. Frekans çeşitliliği ile bir sinyalin kopyalarının birbirlerinden yeterince ayrı frekanslarda iletilerek bağımsız sönümlenmeleri sağlanmaktadır. Benzer şekilde zaman çeşitliliği ile kopyalar farklı zaman dilimlerinde gönderilerek farklı sönümlenmeye zorlanırlar. Bir vericide (alıcıda) birden fazla anten varsa ve bu antenlerin arasındaki mesafe iletişim yapılan frekansa ait dalga boyunun yarısından fazla ise, bu antenlerin gönderdiği (aldığı) sinyallerin maruz kaldığı sönümlenmenin birbirinden yeterince bağımsız olduğu varsayılabilir [5]. Böylece uzamsal çeşitlilik (anten çeşitliliği) sağlanmış olur. Çok-girdili çok-çıkıtlı (MIMO) mimari de temelde uzamsal ve/veya zamansal çeşitliliğe dayanan güçlü bir çözümdür [6]. Ancak, uygulamada vericilerin birden fazla antene sahip olması boyut kısıtı veya donanımsal karmaşıklıktan dolayı mümkün olmayabilir. Bu noktada, farklı kullanıcıların antenlerinin sanal bir anten dizisi yaratacak şekilde aynı sinyali iletmek için kullanılması fikri ortaya çıkmıştır [2]. Diğer bir deyişle, işbirlikçi iletişim, sistemdeki bir birimin iletişimine diğer birimlerin de katkı sağlamasını getirmektedir. Sonuç olarak yapay bir verici anten çeşitliliği sağlanmaktadır. Bunu yaparken, bir antenden çıkan sinyal kablosuz iletişim kanalının yapısı gereği hedeflenen alıcı dışındaki birimler tarafından da algılanabildiği için ek bir verici gücüne ihtiyaç duyulmamaktadır.

İşbirlikçi iletişimin gerçekleştirildiği ağ çeşitlerinden birisi de röle ağlarıdır. Röle kanalı ilk kez Van Der Meulen [7] tarafından çalışılmıştır. Cover ve El Gamal, Gaussian

kanalda kaynak birimin verilerinin iletimine yardımcı olmak üzere konuşlandırılan bir röle kullanarak sistemin kapasitesinin artırılabilirliğini göstermiştir [8]. Daha sonra benzer bir çalışma Rayleigh sönümlenmeye maruz kalan bir kablosuz röle ağı için yapılmıştır [9]. İşbirliği yapıldığı durumda servis kesilme olasılığının düşürülebildiği [2]'de gösterilmiştir. [4] çalışmasında Rayleigh sönümlenen 3 birimli (kaynak, röle ve hedef) bir kablosuz ağda, kaynak ile hedef arasında doğrudan iletişim yapılabildiği durumda, tam çeşitlemenin (full diversity) başarılabilirliği gösterilmiştir.

Buraya kadar aktarılan röle sistemlerinde genellikle kaynak ile hedef arasındaki iletişime ek olarak kaynak-röle-hedef linkinin sisteme katkısı irdelenmiştir. Ancak kimi durumlarda, kaynak ile hedef arasında, gölgelenme vb. nedenlerden, doğrudan bir bağlantı kurulamayabilir ya da aradaki mesafe çok fazla ise sağlıklı bir iletişim için gereken verici gücü maliyeti çok yüksek olabilir. Bu güç sağlanabilse bile hem batarya ömrü kısılacak hem de yakındaki diğer iletişim birimlerinde yüksek girişime neden olacaktır [1]. Bu yüzden amaçları sadece verici ile alıcı arasındaki iletişimi sağlamak olan röle birimler kullanılabilir. Bu sistemler saf röle (pure relay) sistemleri olarak da adlandırılırlar [10]. Böylece vericinin kapsama alanı genişletilmiş olur. Aynı zamanda, sistemdeki toplam güç sınırlandırılarak kaynak-hedef arasındaki direk iletişimle karşılaştırıldığında da iletişim kalitesinde [11] ve ortalama servis kesilme sürelerinde [12] iyileşme yaratmaktadırlar. Çok-sekmeli sistemin direk linke göre dezavantajı ise rölelemeden kaynaklı olarak paket gecikme sürelerinin artmasıdır. Bu tez çalışmasında esas alınan çizgisel topolojideki röle ağları pratikte oldukça yaygındırlar. Buna bir örnek olarak iki-sekmeli uydu sistemleri (bent pipe) verilebilir. Günümüzde WLAN, tasarsız ağlar ve kablosuz duyurga ağları da çizgisel röle topolojisi kullanılmaktadırlar. Hücresel ağlara da röle sistemleri entegre edilmektedir. Hücresel ağın kapsama alanının genişletilmesine örnek vermek gerekirse Şekil 1.1'deki gibi denizin ortasındaki petrol çıkarma platformundaki mobil kullanıcılar için şamandıralar üzerine konuşlandırılacak röle birimleri tahsis etmek kullanıcıları pahalı bir alternatif olan uydu haberleşmesinden kurtarabilir. Röle kullanmanın bir diğer avantajı rölelerin baz istasyonları gibi bir altyapıya (omurga ağına) ihtiyaç duymamaları, sadece güç kaynağı gerektirmeleridir [13], [14]. [13]'te Manhattan benzeri gölgelenmelerden dolayı

uzamsal ayrışmanın mümkün olduğu bir ortamda baz istasyonunun etrafına yayma düzlemine izotrop anteni olan 4 adet röle istasyonu yerleştirilerek iki-sekmeli bir yapı oluşturulmuş ve sistemin akış hızına olan etkisi incelenmiştir. [15] çalışmasında yönlü antenler kullanılarak [13]'teki akış hızlarının artırılabilirliği gösterilmiştir. Yeni nesil iletişim standartlarının yüksek taşıyıcı frekansına (2 GHz üstü) sahip olması, sinyaldeki zayıflama daha fazla olduğu için, kapsamı alanının sınırındaki kullanıcılara yüksek hızlarda hizmet verilmesine engel teşkil etmektedir. Tasarımlar bu doğrultuda gözden geçirilmiştir. WiMAX teknolojisinde çok-sekmeli röleler ile mevcut sistemlerin genişletilmesi ihtiyacı 802.16j standardında yer almıştır [16]. Benzer şekilde LTE (Long Term Evolution) ağ mimarisinde yer almayan röleler LTE-Advanced'te yer almaktadır ve baz istasyonu ile kullanıcı arasındaki röle sayısı 2 ile sınırlandırılmıştır [17].



Şekil 1.1 Röle Kullanarak Kapsama Alanının Genişletilmesi [17]

Özellikle 2-sekmeli (dual-hop) sistemler, analizleri nispeten kolay olduğu ve pratikte uygulanabilir oldukları için araştırmacıların ilgisini çekmişlerdir. [18] çalışmasında kaynak-röle-hedef üçlüsünden oluşan iki sekmeli bir sistemin Rayleigh sönümlenme altındaki bit hata olasılığı (BER), servis kesilme kapasitesi ve servis kesilme olasılığı başarımları incelenmiştir. [19]'da bir röle yerine birden fazla paralel rölenin kullanılmasıyla servis kesilme olasılığının düşürülebildiği gösterilmektedir ve bu yöntem çok-kullanıcı çeşitliliği (multi-user diversity) olarak adlandırılmaktadır. [20]'de iki-sekmeli birden fazla rölenin olduğu bir sistemde zamanlayıcılar kullanılarak en iyi kaynak-röle-hedef linkinin bulunmasını sağlayan

basit bir dağıtık yöntem tanımlanmıştır. [11] çalışmasında kanalın yayım (broadcast) özelliğinden faydalanarak bir çizgisel röle sisteminde rölelerin kendisinden önce iletim yapan rölelerden gelen sinyalleri birleştirmesiyle BER başarımının iyileştirilebileceği gösterilmiş ve bu yaklaşıma çok-sekme çeşitliliği (multi-hop diversity) adı verilmiştir. [21]-[22] ve [42] çalışmalarında ise, sırasıyla Rayleigh ve Nakagami-m sönümlenmenin gerçekleştiği çok-sekmeli çizgisel röle sistemleri için, çok-sekme çeşitliliğine farklı bir bakış açısıyla yaklaşmıştır. Her bir rölenin sırayla iletim yaptığı geleneksel röleleme [12], [23], [24] yerine, sekmelerin kanal durum bilgilerinin (KDB) merkezi bir birim tarafından değerlendirilerek en kaliteli kanalda iletimin yapıldığı bir yöntem önerilmiştir. Böylece sistemin BER ve servis kesilme olasılığı başarımların oldukça iyileştirilebileceği gösterilmiştir. Bu yöntemde birimlerin iletim yapma sıraları anlık çizgelendiği için, birimler iletim yapamadıkları zamanlarda paketleri geçici olarak saklamak için tampon bellek kullanırlar. Bu sınırlı kapasiteli tampon belleklerin doğası gereği alıcı birimlerin belleği doluyorsa gelen paketi ıskartaya çıkartması gerekebilir veya alıcının kapasitesinin dolu olduğu bilinebilirse bu iletim ertelenebilir.

Röle ağlarında tampon bellek kullanımı son zamanlarda araştırma konusu olmuştur. [25]'te geleneksel rölelemenin yapıldığı bir kaynak-röle-hedef sistemi için rölede bellek kullanarak kapasitenin arttırabileceği gösterilmiştir. Ancak, bu tasarımda paket kayıpları yaşanabilmektedir. [26]'da LTE-Advanced mimarisindeki rölenin bellek kapasitesinin, bellek taşma ve boşalma olasılıklarına etkisi incelenmiştir. [27]'de rölelerde tampon bellek kullanılarak kaynak-röle ve röle-hedef sekmelerinde iletim için farklı rölelerin seçilebilmesi sağlanmış, [20]'deki başarımlar arttırılmıştır. Bu çalışmalarda kaynak ve rölelerin iletim zamanları statik iken, çizgellemeyi dinamik yapan çalışmalar da olmuştur. [28]'de belleğinde gönderecek paket olma ve SNR'ın bir eşik değerden yüksek olma şartıyla röle-hedef sekmelerine öncelik verilmiştir. Aksi takdirde, kaynak-röle sekmelerinde iletim yapılmaktadır. Kaynak-röle sekmeleri de eşik SNR koşulunu sağlamıyorsa iletim gerçekleşmemektedir. Bu yöntemde bir röle iletim için seçildiğinde göndereceği paketi diğer rölelerin belleklerinden silmesi gerekmektedir. [29] ve [30]'da çizgelleme yapılırken bellek doluluk durumları da hesaba katılmıştır.

Rölelerin işbirliği yaparken kullandıkları stratejiler temelde ikiye ayrılır. Bunlar Çöz-ve-İlet ve Yükselt-ve-İlet stratejileridir [3], [4]. Çöz-ve-İlet alınan sinyalin çözümlenmesini gerektirir. Çözümlenen paket tekrar modüle edilerek iletilir. Yükselt-ve-İlet ise alınan sinyalin çözümlenmesini gerektirmez. Maliyeti daha düşük, sadece fiziksel katmanda işlem yaptığı için karmaşıklığı azdır. En büyük dezavantajı ise alınan sinyale eklenen gürültü ve girişimi izole edemeden yükselterek iletmesidir. Çöz-ve-İlet ise gürültü ve girişimden arındırılmış şekilde sinyali iletir. Ancak kazanç karşılığında bir miktar gecikme yaşanmaktadır [17]. Ayrıca Çöz-ve-İlet kullanılarak herhangi bir sekmede yapılacak hata tüm sistem boyunca yayılmaktadır, bunun önüne geçmek için kanal kodlaması ve ARQ gibi mekanizmalar kullanılabilir. [18] çalışmasında, Rayleigh sönümlenmeye maruz kalan iki sekmeli sistemde, Çöz-ve-İlet'in düşük SNR değerlerinde daha düşük servis kesilme olasılığı olduğu, yüksek SNR değerlerinde ise her iki stratejinin de benzer başarıma sahip olduğu gösterilmiştir.

Sönümlenen bir kanalda iletişim gerçekleştirilirken verici gücü, veri hızı, sembol hızı, kanal kodlaması tipi gibi belirli parametrelerinin ayarlanması, kanal kapasitesinden daha iyi bir şekilde yararlanılmasını sağlar. Gerçek zamanlı yapılan bu ayarlama sayesinde sistemin BER başarımından ödün vermeden veya verici gücünü verimsiz kullanmadan izgesel verimlilik artırılır [31]. İzgesel verimliliği arttırmada özellikle hız ayarlamasının oldukça etkin olduğu bilinmektedir [32]. Hız ayarlaması kiplenim tipi veya sembol süresi değiştirilerek yapılabilir, ancak ilk yöntem sistemin bant genişliğini sabit tuttuğu için tercih edilmektedir. Uyarlamalı kiplenim, ardışık çerçeveler arasında kanal kalitesindeki keskin değişimlerin görece olarak daha az olduğu yavaş sönümlenen kanallarda daha etkindir. Uyarlamanın hızı en az çerçeve hızında olmaktadır. Uyarlamanın yapılabilmesi için önce alıcı tarafında kanal kalitesi kestirimi yapılması gerekmektedir. Daha sonra vericinin uygun kiplenim tipini kullanabilmesi için bu kanal kalitesi durumunun vericiye hatasız olarak geribildirim yoluyla beslenmesi gerekmektedir. Çok-sekmeli sistemlerin kapasite başarımına uyarlamalı kiplenim etkisi ilk olarak [33] çalışmasında incelenmiş, ayarlama kanal istatistiklerine (ortalama SNR) göre yapılmıştır. Kanalların anlık kalitelerine göre ayarlama yapan bir yöntem [34] çalışmasında önerilmiştir, ancak tüm sekmelerde aynı kiplenim tipi kullanılacağı varsayılmıştır. Sekmelerin anlık SNR değerleri bilgileri birleştirilerek

sistemin BER başarımını istenen seviyenin altına düşürmeyecek izgesel verimliliği en yüksek kiplenim tipi seçilmiştir. Ancak, geleneksel röleleme yapılan bu sistemde, hedeften kaynağa doğru tüm birimlerin bir önceki birime kanal durumunu beslemesi gerekmektedir. Bu işlem de sekme sayısının fazla olduğu durumda uzun sürecek, ertesinde iletişim gerçekleşirken hedefe yakın sekmelerin kanal durumları çoktan değişmiş olabilecektir. Bunun yerine, bu çalışmada yapıldığı gibi, rölelere tampon bellek eklenerek her bir sekmede ayrı kiplenim tipi kullanılıp izgesel verimlilik daha fazla artırılabilir. Benzer bir çalışmayı Müller iki-sekmeli bir sistem için hem kiplenimi hem kanal kodlamasını uyarlayarak (AMC) yapmıştır [35]. Ancak kaynak ve rölenin iletim zamanları statik olduğu için bu sistem uzamsal çeşitlilikten yararlanamamaktadır.

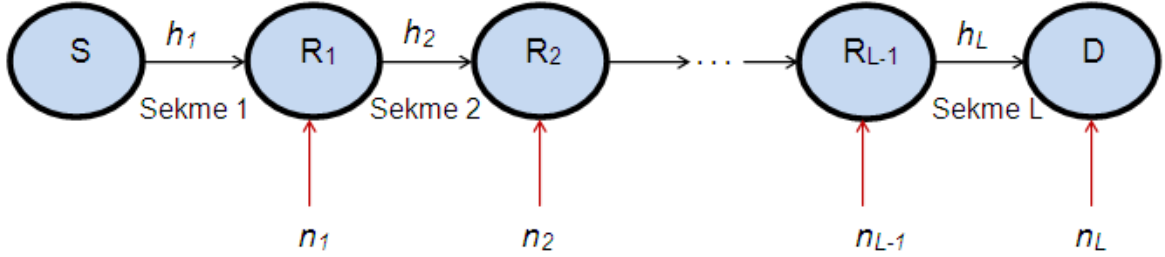
Bu tez çalışmasında, [21] çalışmasındaki çizelgeleme işleminin pratikte uygulanmasını pek mümkün kılmayan merkezi kontrol biriminin yerine dağıtık bir yöntem önerilmiştir. İkinci bölümde geleneksel ve merkezi yöntem kısaca değinilmiş, önerilen dağıtık yöntem tanımlanmıştır. Üçüncü bölümde yöntemlerin başarımlarının karşılaştırılması için kullanılan benzetimin adımlarına değinilmiş, yöntemler uçtan uca bit hata olasılığı, akış hızı, ortalama ve maksimum paket gecikmesi, blok gecikmesi, tampon bellek doluluk başarımları açısından değerlendirilmiştir. Bu başarımlara sistemdeki sekme sayısının, birimlerdeki tampon bellek kapasitelerinin ve eşik SNR değerlerinin etkileri incelenmiştir. Dördüncü bölümde uyarlamalı kiplenim kullanılmasının sistemin başarımına olan etkisi incelenmiştir. Çalışmanın beşinci ve son bölümünde ise çalışmada elde edilen sonuçlara ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara değinilmiştir.

2. ÇİZELGELEME YÖNTEMLERİ

Bu bölümde, mevcut ve önerilen çizelgeleme yöntemleri ile bu yöntemlerin geçerli olduğu sistem ve kanal modelleri ele alınmıştır.

2.1 Sistem Modeli

Sistem, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, bir kaynak (gönderici) birim, bir hedef (alıcı) birim ve bu ikisi arasında konuşlandırılmış; görevleri kaynaktan hedefe gönderilen verilerin iletimine yardımcı olmak olan röle birimlerinden oluşmaktadır. Tüm birimlerde gönderim ve/veya alım için kullanılan 2-hüzmeli (kaynak ve hedef yönüne) bir anahtarlamalı-hüzme anteni vardır. Veri iletimi tek yönde (kaynaktan hedefe) olduğu için böylece bir sekme arayla iki sekmede (örneğin Sekme 1 ve Sekme 3'te) aynı anda iletim yapılabilir. Her birimin sabit olan çıkış gücü öyle seçilmiştir ki, sadece komşu birimlerde alınan sinyal seviyeleri alıcı hassasiyetinin üstünde kalmaktadır. Böylece, iletim yapan her bir birimin komşuları dışındaki birimlerde girişime neden olmasının önüne geçilmiştir. Sistemdeki her bir sekmede ortalama sinyal gürültü oranı (SNR) değerleri, analizi daha kolay kıldığı için, eşit alınmıştır. İletim yapan tüm birimler kiplenim tipi olarak İkili Evre Kaydırmalı Kiplenim (BPSK) kullanmaktadır. Tüm birimlerin iletim yapacakları kanalın durum bilgisine (KDB) sahip oldukları varsayılmıştır.



Şekil 2.1 Sistem Modeli

Röle birimleri kendilerine bir önceki birimden gelen sinyali bir sonraki birime iletirken Çöz-ve-İlet işbirliği stratejisini kullanmaktadır. Rölelerin her birinde aldıkları veri paketlerini, bir sonraki birime iletmek için uygun koşullar oluşuncaya kadar, saklamak için aynı kapasiteye sahip tampon bellek (TB) yer almaktadır. Kaynak ve hedef birimlerde ise sonsuz kapasitede tampon bellek olduğu ve

kaynak birimde her zaman gönderilecek bir paket olduğu (sistemin kararlı halde çalıştığı) varsayılmıştır.

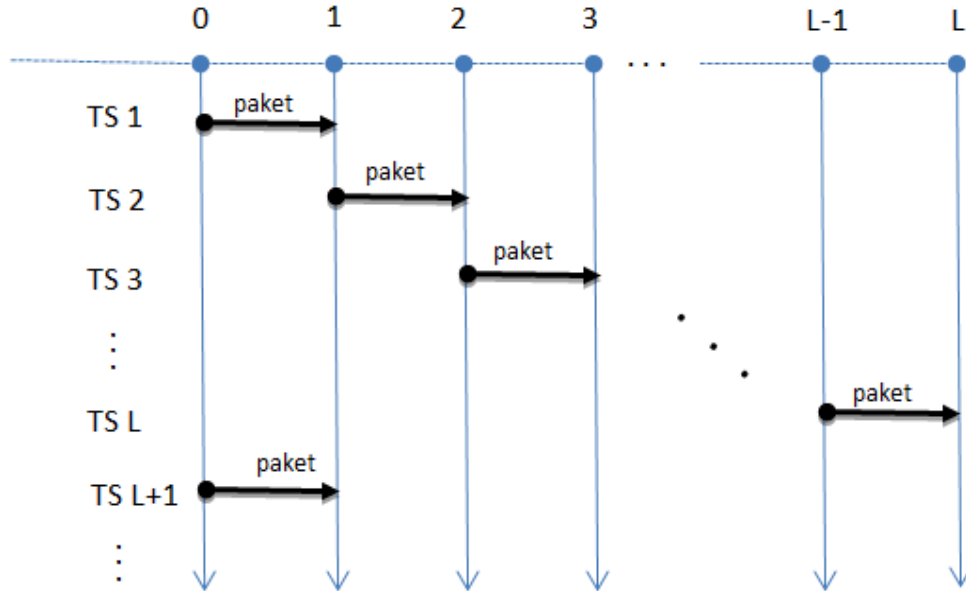
2.2 Kanal Modeli

Birimler arasındaki kanallar bağımsız ve özdeşçe dağılmış Rayleigh sönümlenmeye maruzdur. Her bir kanaldaki sönümlenmenin bir zaman dilimi süresi boyunca sabit olup, farklı zaman dilimleri için birbirinden bağımsız olduğu varsayılmıştır. Diğer bir deyişle, kanallar yavaş sönümlenmektedir. Tüm iletişimin aynı frekansta yapıldığı da göz önünde bulundurularak birimler arasındaki kanalların, aynı zaman diliminde, iki yönde (Birim A'dan Birim B'ye iletim kanalı ve Birim B'den Birim A'ya iletim kanalı) karşılıklılık ilkesine [36] uyduğu varsayılmıştır.

2.3 Çizelgeleme Yöntemleri

2.3.1 Geleneksel Çizelgeleme Yöntemi

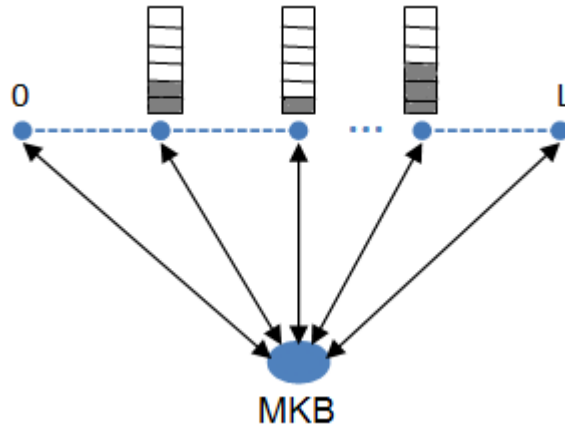
Bu yöntem, Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, her bir birimin kanalın o anki kalitesi gibi herhangi bir koşuldan bağımsız olarak, kendisine tanımlanmış zaman diliminde (TS) iletim yapmasını öngören görece basit bir yöntemdir. Röleler Çöz-ve-İlet işbirliği stratejisiyle çalışırlar, sadece gelen tek bir paketi tutmak için tampon bellekleri vardır, bunun dışında ek tampon bellek ihtiyaçları yoktur. L-sekmeli bir sistemde bir paketin alıcıya ulaşması için L adet zaman dilimine ihtiyaç vardır.



Şekil 2.2 Geleneksel Çizelgeleme Yöntemi

2.3.2 Merkezi Çizelgeleme Yöntemi

Geleneksel yöntem, sistemin başarımını arttırmada kullanılabilir KDB'den hiçbir şekilde yararlanmaz. [21] numaralı çalışmada tanımlanan ve bu tez çalışmasında Merkezi Çizelgeleme Yöntemi olarak nitelendirilen yöntem ise KDB'den yararlanmayı amaçlar ve geleneksel yöntemden farklı olarak Merkezi Kontrol Birimi'ne (MKB) ihtiyaç duyar. MKB, tüm diğer birimlerle Şekil 2.3'te verildiği gibi iletişim kurup kanal durum ve tampon bellek doluluk/boşluk bilgilerini alarak, bu bilgiler ışığında bir sonraki zaman diliminde iletim yapacak birime karar verir. MKB, karar verirken tampon belleği boş olmayan gönderici ve tampon belleği dolu olmayan alıcının olduğu sekmeler arasından en yüksek anlık SNR değerine sahip sekmeyi seçer. Verdiği kararı alıcı ve verici olarak atanan birimlere iletilmesinin hemen ertesinde iletim gerçekleşir. Bu yöntem çok antenli alıcılardaki seçim çeşitliliğine benzer [37]. Bu yöntemde birimler, bir süre iletim yapamama olasılığı nedeniyle, paketleri saklama ihtiyacı duyarlar. Bu yüzden her röle biriminde tampon bellek vardır.



Şekil 2.3 Merkezi Çizelgeleme Yöntemi

Ancak bu yöntem pratikte çok uygulanabilir değildir; çünkü dağıtık tasarsız ağlarda her birimin komşu birimler dışında bir de MKB ile iletişim hattının olduğu ve bu hatlarda iletişimin hatasız olduğu varsayımlarını gerçekleştirmek kolay değildir. Bu tez çalışmasında Merkezi Çizelgeleme Yöntemi'ne alternatif olarak önerilen Dağıtık Çizelgeleme Yöntemi sonraki bölümde tanımlanmıştır.

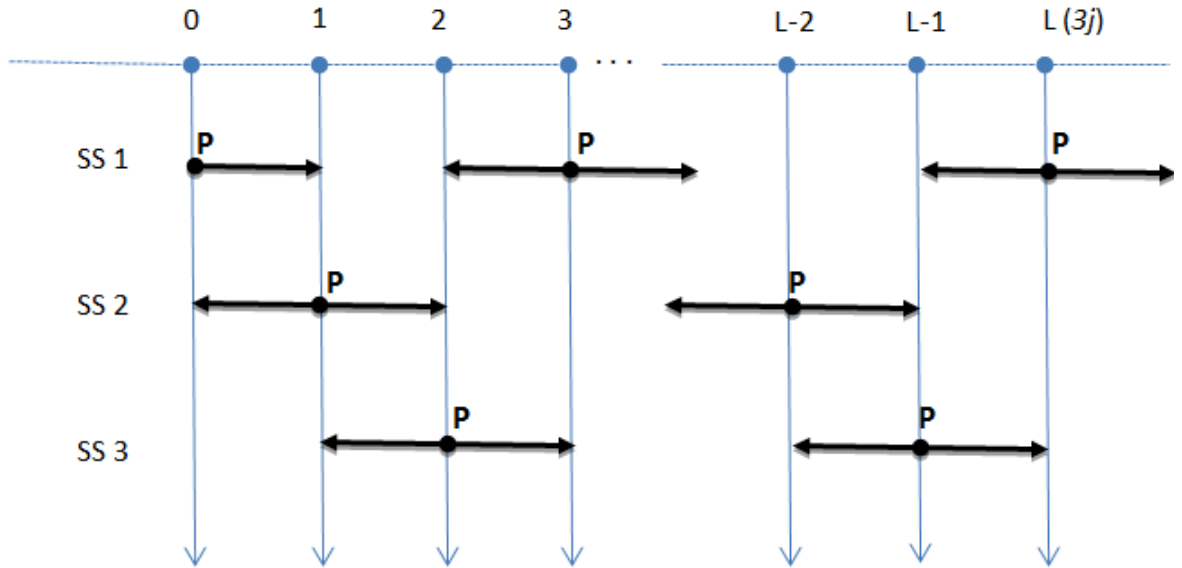
2.3.3 Dağıtık Çizelgeleme Yöntemi

Önerilen bu yöntemde birimler MKB'ye ihtiyaç olmadan kendi aralarında haberleşerek iletim yapacak birim veya birimlere karar verirler. Yöntemin doğası gereği aynı zaman diliminde birden fazla birim iletim yapabileceği gibi hiçbir birim iletim yapmıyor da olabilir. Yöntem üç aşamadan oluşmaktadır.

2.3.3.1 Kanal Kalitesi Kestirimi Aşaması

Bu aşamada tüm birimler, kendilerine komşu birimlere, kanal durum bilgilerinin oluşturulabilmesi için Şekil 2.4'te gösterildiği biçimde pilot sinyaller yollarlar. Ayrıışmış birimler aynı anda pilot sinyal gönderebilir, bu sayede toplam birim sayısı ne olursa olsun bu aşama 3 sembol süresinde (SS) tamamlanmış olacaktır.

Bir anten aynı anda hem alıcı hem gönderici olamayacağı için komşu birimler aynı anda yayım yapamazlar [38]. Bununla birlikte bir birimdeki sol ve sağ komşuların yayımladığı sinyallerin oluşturacağı girişimi engellemek için, ilgili birimin sol ve sağ komşularının da aynı anda yayım yapmasına izin verilmez. Sembol süresi $i = 0, 1, 2, \dots$ boyunca $j = 0, 1, 2, \dots$ ve $i + 3j \leq L$ olmak üzere $(i + 3j)$ numaralı birimler pilot sinyallerini yayımlarlar. Komşu birimler bu sinyalleri alarak ilgili sekmenin kanal kalitesine karar verirler.



Şekil 2.4 Kanal Kalitesi Kestirimi Aşaması

2.3.3.2 Tampon Bellek Durumlarının Paylaşılması Aşaması

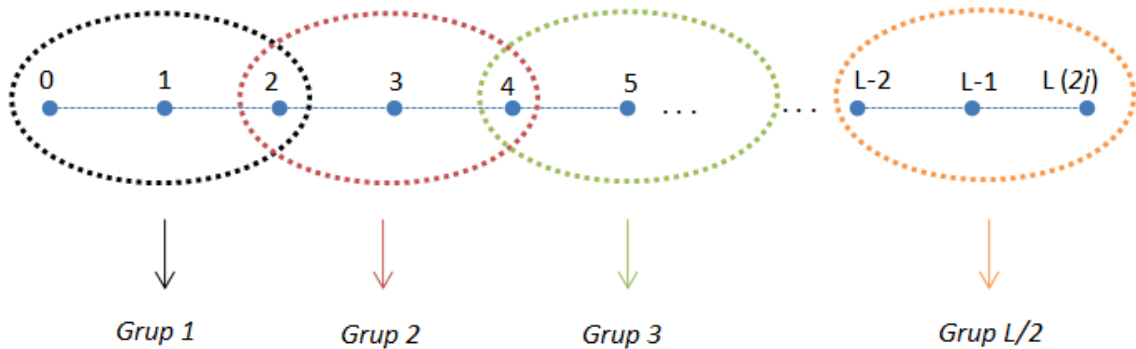
Kanal kalitesi kestirimi aşamasına çok benzeyen bu aşamada birimler tampon belleklerinde hiç paket olmadığını (gönderici birim olamayacaklarını) veya belleklerinin dolu olduğunu (alıcı birim olamayacaklarını) komşu birimlere yaptıkları yayım ile bildirirler. Eğer bellekleri boş veya dolu değilse kendilerine atanan sembol süresinde sessiz kalır, yayım yapmazlar. Örnek olarak; bellekleri dolu ise +1, bellekleri boş ise -1 sinyali gönderebilirler.

Ayrılmış birimler aynı anda bellek durumu sinyali gönderebilir, bu sayede toplam birim sayısı ne olursa olsun, Şekil 2.4'ten de gözlenebileceği gibi, 3 sembol süresinde (SS) bu aşama tamamlanmış olacaktır.

Bir anten aynı anda hem alıcı hem gönderici olamayacağı için komşu birimler aynı anda yayım yapamazlar. Bununla birlikte bir birimdeki sol ve sağ komşuların yayımladığı sinyallerin oluşturacağı girişimi engellemek için, ilgili birimin sol ve sağ komşularının da aynı anda yayım yapmasına izin verilmez. Sembol süresi $i = 0, 1, 2, \dots$ boyunca $j = 0, 1, 2, \dots$ ve $i + 3j \leq L$ olmak üzere $(i + 3j)$ numaralı birimler bellek durumu sinyallerini yayımlarlar.

2.3.3.3 Gönderim Yapacak Birimler Hakkında Karar Verilmesi Aşaması

Bu aşamada sistemdeki birimler Şekil 2.5'te verildiği gibi üçerli gruplara ayrılırlar. Sistemde tek sayı ile indekslenmiş birim sayısı kadar grup oluşacaktır. Çift sayı ile indekslenmiş birimler (kaynak ve hedef hariç) ardışık iki gruba dahil olacaktırlar.



Şekil 2.5 Birimlerin Gruplandırılması

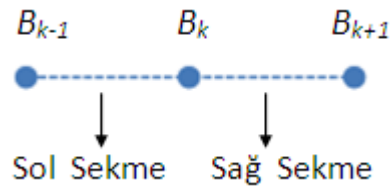
Her bir birim karar mekanizması süresince {Boş, Tx, Rx, X} durumlarından birinde olabilecektir. Durumların açıklamasına Tablo 2.1'de yer verilmiştir. Karar sürecinin

başında tüm birimler 'Boş' durumunda iken karar süreci sona erdiğinde hiçbir birim 'X' durumunda olamaz. Karar süreci gereği, sadece çift sayı ile indekslenmiş birimler 'X' durumda olabilir.

Tablo 2.1 Birim Durumları

Durum	Açıklama
<i>Boş</i>	Birimin alıcı veya gönderici olmayacağını ifade eder.
<i>T_x</i>	Birimin bir sonraki birime gönderim yapacağını ifade eder.
<i>R_x</i>	Birimin bir önceki birimden alım yapacağını ifade eder.
<i>X</i>	Birimin hem alıcı hem gönderici olması gerektiği (kararsız) durumdur.

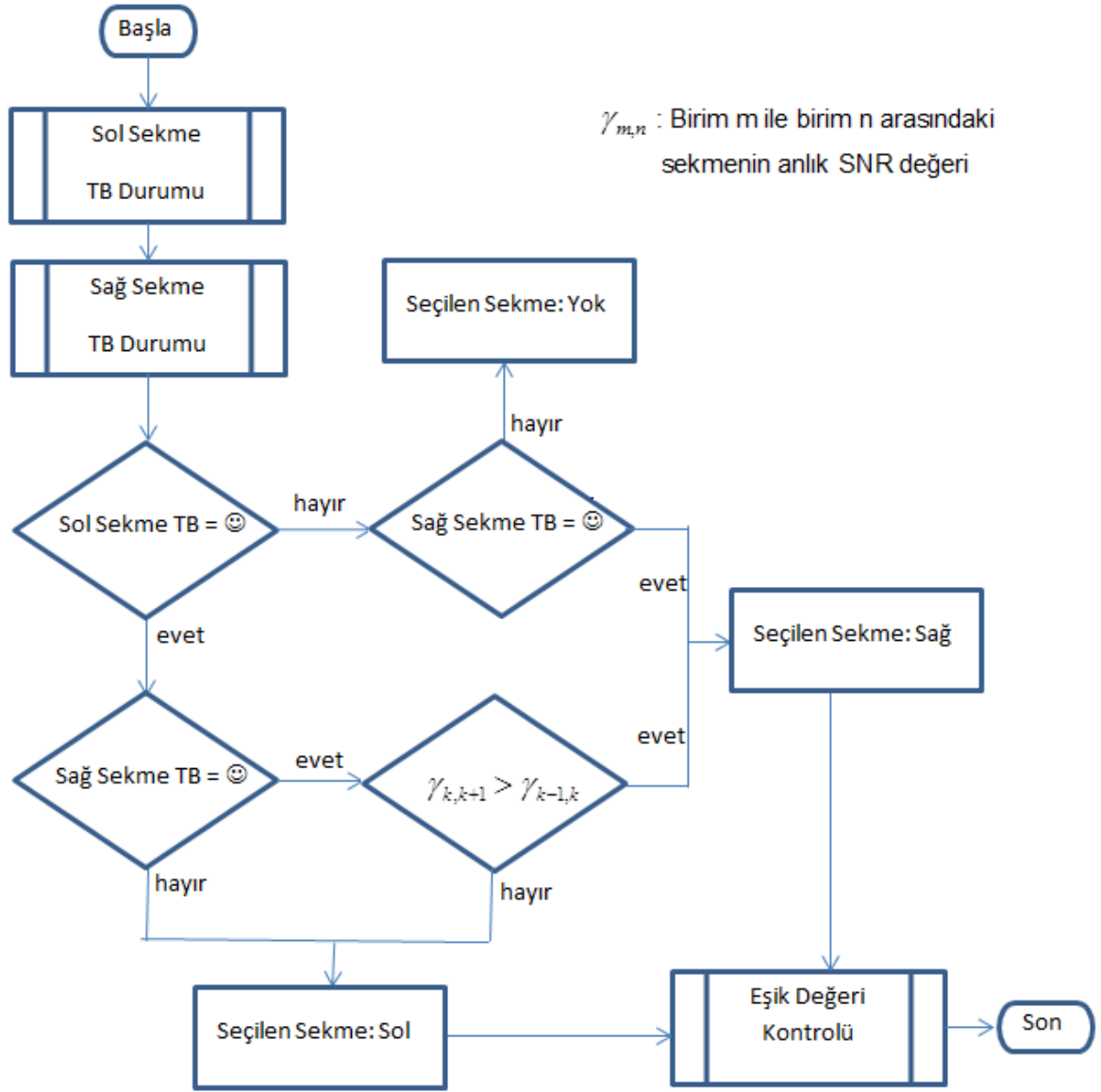
Şekil 2.6'da gösterilen her bir gruptaki tek sayı ile indekslenmiş (genellikle merkezdeki) birim (B_k), kendisinden önceki (B_{k-1}) ve kendisinden sonraki (B_{k+1}) birimlerin tampon bellek durumlarını ve aralarındaki kanal durumlarını bildiği için kendisinin (B_k) mi yoksa bir önceki birimin (B_{k-1}) mi iletim yapacağına Şekil 2.7'de verildiği biçimde karar verir.



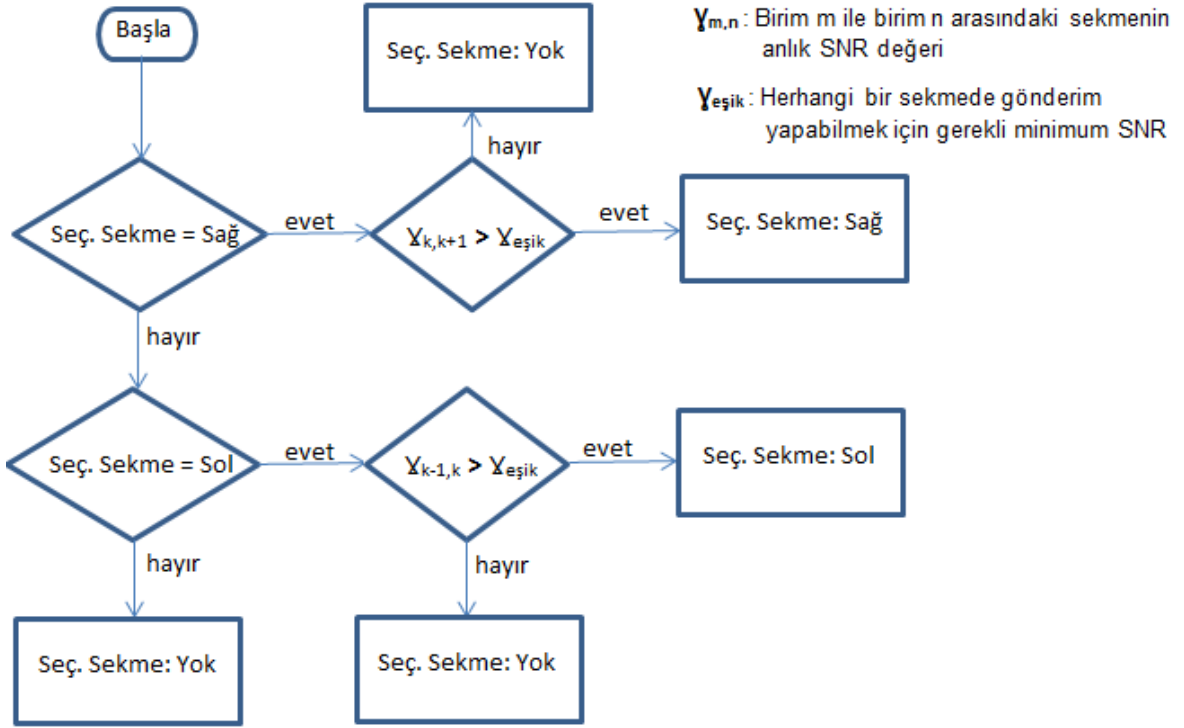
Şekil 2.6 Üç Birimden Oluşmuş Bir Grup

B_k bu kararı verirken önce Şekil 2.9'daki gibi sol sekme ve sağ sekmenin tampon bellek durumu açısından uygunluğunu kontrol eder. Sol sekmenin uygun olması için B_{k-1} biriminin tampon belleğinde gönderilecek paket ve B_k biriminde de bu paketi tutabileceği boş alan olmalıdır. Sağ sekmenin uygun olması için B_k biriminin tampon belleğinde gönderilecek paket ve B_{k+1} biriminde de bu paketi tutabileceği boş alan olmalıdır. Eğer hem sol hem sağ sekme tampon bellek açısından uygun

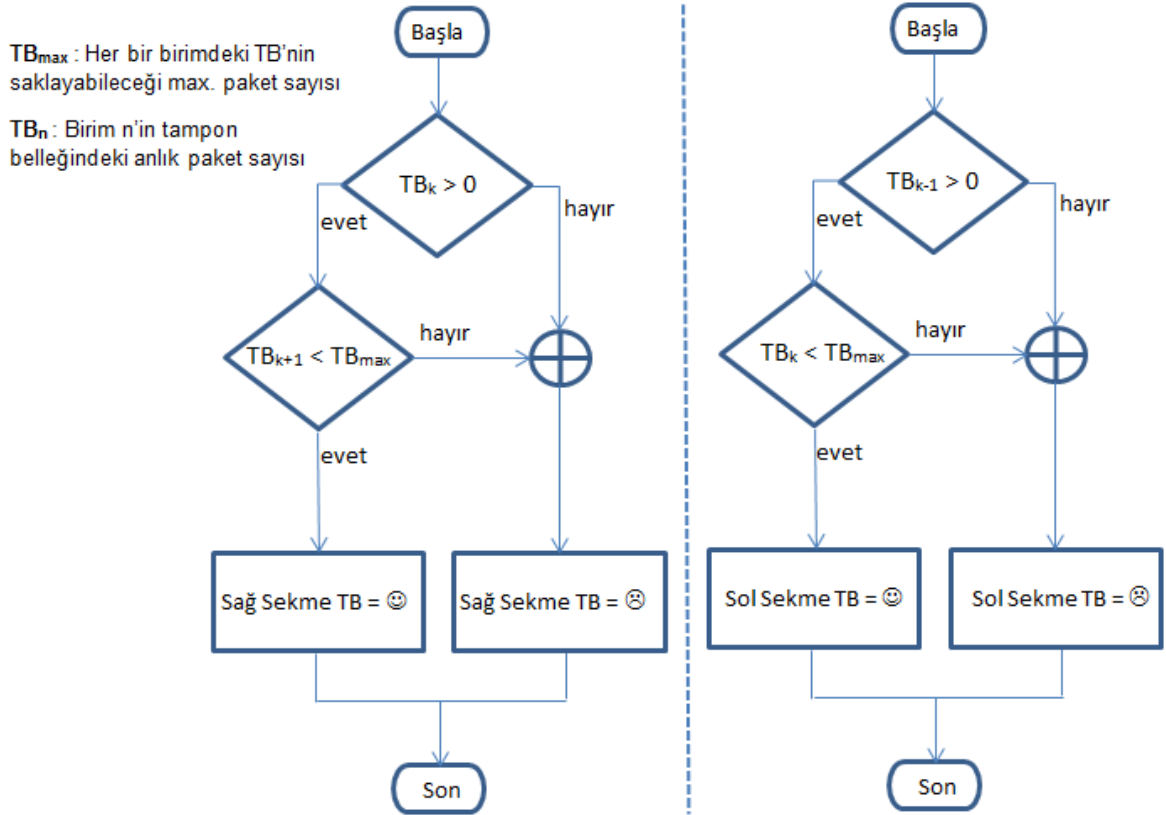
durumda değilse hiçbir birimin gönderim yapmamasına karar verilir. Sekmelerden yalnızca biri uygun durumda ise o sekmenin, her iki sekme de uygun durumda ise sekmelerden anlık SNR değeri daha yüksek olan sekmenin anlık SNR değerinin sistem için tanımlı bir eşik SNR değerinden büyük olup olmadığı Şekil 2.8’de gösterildiği şekilde kontrol edilir. Bu sekme, eğer eşik SNR değerinden büyük bir anlık SNR değerine sahipse bu grup için gönderim yapması uygun bulunan birim olacaktır; aksi durumda bu gruptan gönderim için uygun bir birim bulunamamıştır.



Şekil 2.7 Gönderim Yapacak Birim Tespiti Karar Ağacı



Şekil 2.8 Eşik Değeri Kontrolü Karar Ağacı



Şekil 2.9 Sağ (Sol) Sekme TB Durumu Karar Ağacı

$B_k = 1, 3, 5, \dots$ olacak şekilde tek numaralı tüm birimler, iletim yapacak birime karar verdikten sonra, bu kararlarını komşularına bildirirler. Eğer kendileri (B_k) yayım yapacaksa 'T' koordinasyon sinyalini, (B_{k-1}) yayım yapacaksa 'R' koordinasyon sinyalini iletirler. Bu iletim süreci toplam 2 SS kadar sürecektir. SS 1'de $u = 0, 1, 2, \dots$ ve $1 + 4u \leq L$ olmak üzere ($1 + 4u$) numaralı birimler iletim yapar. SS 2'de ise $v = 0, 1, 2, \dots$ ve $3 + 4v \leq L$ olmak üzere ($3 + 4v$) numaralı birimler iletim yapar. Yayım yapacak uygun birim bulunamamışsa, bu sembol süresini koordinasyon sinyali iletmeyen sessiz geçirirler. Koordinasyon sinyallerini alan birimlerin durum geçiş matrislerine Tablo 2.2'de yer verilmiştir.

Tablo 2.2 Koordinasyon Sinyallerini Alan ve İleten Birimlerin Durum Geçişleri

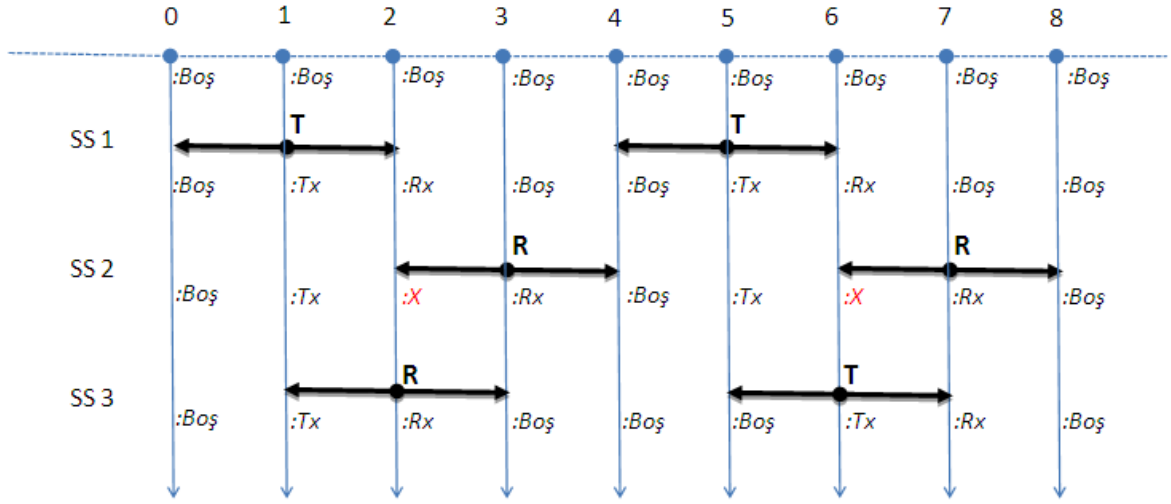
Koordinasyon Sinyali	Kaynak Birim	Koordinasyon Sinyalini Alan Birimin Mevcut Durumu				Kaynak Birim Durumu
		Boş	Tx	Rx	X*	
T	Sol Komşu	Rx	-	Rx	-	Tx
	Sağ Komşu	Boş	Boş	-		
R	Sol Komşu	Boş	-	Boş	-	Rx
	Sağ Komşu	Tx	Tx	X		
Sessiz	Sol Komşu	Boş	-	-	-	Boş
	Sağ Komşu	Boş	Tx	Rx		

Tablo 2.2'yi yorumlamak gerekirse bir birimin 'X' durumuna geçmesi için mevcut durumunun 'Rx' olması ve sağındaki komşu birimden R koordinasyon sinyalini alması gerektiği görülmektedir.

2 sembol süresinin sonunda çift sayı ile indekslenmiş birimlerden ($B_{çift}$) 'X' durumunda olanlar, soldaki ve sağdaki komşularıyla olan sekmelerin anlık SNR değerlerini karşılaştırır ve sağdaki sekme daha iyiyse T değilse R koordinasyon sinyalini yollar. Aynı zamanda kendi durumunu T sinyalini yolladıysa 'Tx' olarak, R sinyalini yolladıysa 'Rx' olarak günceller. Ardışık çift numarayla indekslenmiş birimler hiçbir zaman aynı anda 'X' durumunda olamazlar. Bu ayrışmışlık nedeniyle tek bir sembol süresinde tüm 'X' durumları 'Tx' veya 'Rx' durumlarına geçebilecektir.

Böylece toplam 9 sembol süresinde (pilot, bellek durum, koordinasyon sinyallerinin tamamı gönderilerek) birim sayısı ne kadar fazla olursa olsun tüm sistemin koordinasyonu başarı ile tamamlanmış olur. Ancak sistemin tasarlandığı şekilde çalışabilmesi için tüm koordinasyon sinyallerinin alıcı birimlerde doğru çözümlenmesi gerektiği unutulmamalıdır. Bunun için koordinasyon sinyallerinin enerjileri yeterince yüksek olmalıdır.

Şekil 2.10'da 8-sekmeli bir sistemde koordinasyon sinyallerinin gönderimi için bir örnek verilmiştir. Bu örnekte, birinci sembol süresinde 1 ve 5 numaralı birimler gönderim yapma niyetinde olduklarını komşularına bildirmişlerdir. İkinci sembol süresinde, 3 ve 7 numaralı birimler alım yapmak istediklerini komşularına bildirmişlerdir. Üçüncü sembol süresinde ise hem alıcı hem gönderici olması beklenen 2 numaralı birim, 'X' (kararsız) durumundan çıkmak için alıcı olma yönünde karar alıp bu kararı R koordinasyon sinyali ile komşularına bildirmiş ve 'Rx' durumuna geçmiştir. Bunun sonucunda 2 numaralı birimden paket almayı isteyen 3 numaralı birim 'Rx' durumundan 'Boş' durumuna geçerek, bu isteğinden vazgeçmek durumunda kalmıştır. Benzer şekilde 'X' (kararsız) durumunda olan 6 numaralı birim gönderim yapma yönünde karar alarak, bu kararını komşularına T koordinasyon sinyali ile bildirmiştir. Böylece tüm sistemin koordinasyonu tamamlanmış olup 1 ve 6 numaralı birimlerin aynı anda gönderim yapması (gönderim yapılacak sekmelerde anlık SNR değerinin eşik SNR değerinin üzerinde olduğu varsayılarak) sağlanmıştır.



Şekil 2.10 Koordinasyon Sinyalleri ve Birimlerin Durumlarına Etkileri

Önerilen yöntemde gönderim yapmasına karar verilmiş birimlerin, en son aşamada, gönderim yapacakları sekmedeki anlık SNR değerinin tanımlı eşik SNR değerinin üzerinde olması durumunda gönderim yapmalarına izin verilmesi önem arz etmektedir. Örneğin; yukarıda ifade edilen 8-sekmeli bir sistemde,

- Tüm birimlerin her zaman tampon belleğinde veri almak için boş yeri olduğu
- Tüm birimlerin her zaman için gönderecek bir veri paketinin olduğu
- Tüm sekmelerdeki ortalama SNR değerinin eşit olduğu

varsayımları yapılırsa (ki bu varsayımlar neticesinde sadece sekmelerdeki anlık SNR değerlerinin karar mekanizmasında etkin rolü olacaktır) ve gönderim yapmasına karar verilmiş birimler için herhangi bir eşik SNR değeri belirlenmezse, Tablo 2.3'teki matristen yararlanarak D_k durumunda aynı anda gönderim yapacak birim sayısı (T_k) şu şekilde ifade edilir:

$$T_k = \begin{cases} 4, & k = 1, 9, 13, 15, 16 \\ 3, & k = 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 14 \\ 2, & k = 6 \end{cases} \quad (2.1)$$

Aynı anda gönderim yapacak birim sayısının beklenen değeri (\bar{T}) de

$$\bar{T} = \sum_{k=1}^{16} T_k / 16 = 3.25 \quad (2.2)$$

olarak hesaplanır.

Tablo 2.3 Tampon Bellek Kısıtı Olmadığı Durumda 8-Sekmeli Bir Sistemin Koordinasyon Sinyalleri Matrisi

Durum	Tek Sayılı Birimlerin Koordinasyon Sinyalleri				Aynı Anda Gönderim Yapacak Birimler*
	B_1	B_3	B_5	B_7	
D_1	T	T	T	T	$B_1 - B_3 - B_5 - B_7$
D_2	T	T	T	R	$B_1 - B_3 - B_{5,6}$
D_3	T	T	R	T	$B_1 - B_{3,4} - B_7$
D_4	T	T	R	R	$B_1 - B_{3,4} - B_6$
D_5	T	R	T	T	$B_{1,2} - B_5 - B_7$
D_6	T	R	T	R	$B_{1,2} - B_{5,6}$
D_7	T	R	R	T	$B_{1,2} - B_4 - B_7$
D_8	T	R	R	R	$B_{1,2} - B_4 - B_6$
D_9	R	T	T	T	$B_0 - B_3 - B_5 - B_7$
D_{10}	R	T	T	R	$B_0 - B_3 - B_{5,6}$
D_{11}	R	T	R	T	$B_0 - B_{3,4} - B_7$
D_{12}	R	T	R	R	$B_0 - B_{3,4} - B_6$
D_{13}	R	R	T	T	$B_0 - B_2 - B_5 - B_7$
D_{14}	R	R	T	R	$B_0 - B_2 - B_{5,6}$
D_{15}	R	R	R	T	$B_0 - B_2 - B_4 - B_7$
D_{16}	R	R	R	R	$B_0 - B_2 - B_4 - B_6$

* $B_{k,k+1}$ şeklindeki gösterimler B_{k+1} numaralı birimin vereceği karara göre B_k veya B_{k+1} numaralı birimin gönderim yapacağını ifade etmektedir.

(2.2)'de ifade edildiği üzere ortalama 3.25 birim aynı zaman diliminde iletim yapabilecektir. Bu çalışmada, her bir zaman diliminde sadece bir birimin BPSK kiplenim tipi ile bir paket iletim yaptığı Geleneksel Çizelgeleme Yöntemi (Merkezi Çizelgeleme Yöntemi için de aynı durum geçerlidir) referans alınarak, Dağıtık Çizelgeleme Yöntemi kullanıldığında tek bir zaman diliminde iletilebilecek ortalama paket sayısı **“düzgelenmiş akış hızı”** olarak tanımlanmıştır. (2.1)'deki değerleri hesaplariken verilen önkoşullar sağlandığında, Dağıtık Çizelgeleme Yöntemi için düzgelenmiş akış hızı değeri (2.2)'de ifade edildiği gibi 3.25 olarak bulunmuş olur. Aynı koşullar altında, 2-sekmeli, 4-sekmeli ve 6-sekmeli sistemler için kolayca hesaplanabilecek düzgelenmiş akış hızı değerleri Tablo 2.4'te verilmiştir. Aynı anda iletim yapabilecek maksimum birim sayısı sekme sayısının yarısı iken, röle grupları birbirinden tamamen ayrılmış olmadığı için ortalama değerleri (düzgelenmiş akış hızı) daha düşük olmaktadır.

Tablo 2.4 Farklı Sekme Sayıları İçin Düzgelenmiş Akış Hızları

Sistemdeki Sekme Sayısı (L)	2	4	6	8
Düzgelenmiş Akış Hızı	1	1.75	2.5	3.25

Birden fazla birimin aynı anda gönderim yapabilmesine rağmen, her bir grup içinden seçilen en iyi birim, o birimin gönderim kanalının çok iyi durumda olduğunu garanti edemeyeceği için BER oldukça yüksek olabilecektir. Bu durumda, gönderim yapacak birimler için uygun bir eşik SNR değeri tanımlanması akış hızı-BER ödünleşiminin sistem gereksinimleri doğrultusunda kontrol altında tutulmasını sağlayacaktır.

3. ÇİZELGELEME YÖNTEMLERİNİN BAŞARIMLARI

Bu bölümde tezde önerilen çizelgeleme yöntemi ve mevcut çizelgeleme yöntemleri MATLAB ortamında oluşturulan benzetimler kullanılarak incelenmiştir. Benzetimlerde, çizelgeleme yöntemleri bit hata olasılığı, düzgelenmiş akış hızı ve paket gecikme süresi başarımları yönünden incelenmiştir. Ayrıca; sistemdeki sekme sayısının, her bir birimdeki tampon bellek kapasitesinin, kullanılan eşik SNR değerlerinin bu başarımlara olan etkileri de incelenmiştir. Son olarak, tampon belleklerin ortalama doluluk miktarları incelenmiştir. Sonuçlarda kullanılan SNR terimi E_s/N_0 'a karşılık gelmektedir. Çizelgeleme yöntemlerinin uçtan uca bit hata olasılığı, düzgelenmiş akış hızı, tampon bellek doluluk ve paket gecikme süreleri başarımlarını incelemek için aşağıda verilen benzetim algoritması oluşturulmuştur.

Benzetim Algoritması

Girdiler:

- Her bir sekmedeki ortalama sinyal gürültü oranı (E_s/N_0): $\bar{\gamma}$
- Uçtan uca gönderilecek paket sayısı: k
- Her bir birimdeki tampon belleğin kapasitesi : TB_{\max}
- İletim yapıp/yapmama kararı için eşik SNR: γ_{th}
- Toplam sekme sayısı: L

Çıktılar:

- Uçtan uca bit hata olasılığı
- Düzgelenmiş akış hızı
- Ortalama paket gecikme süresi
- Maksimum paket gecikme süresi
- Her bir birimin kullandığı ortalama tampon bellek kapasitesi
- Her bir birimin kullandığı maksimum tampon bellek kapasitesi

Adım 1:

Kaynak birimden hedef birime gönderilecek k tane paketten oluşan bitler dizisi

$[p_1 \ p_2 \ \dots \ p_k]$ rasgele yaratılır.

Adım 2:

Her bir sekmedeki (3.1)'deki gibi ifade edilen Rayleigh sönümlenmeye maruz kalan kanalı modellemek için l sekme numarası, t zaman dilimi ve k adet paketi kaynaktan hedefe iletmek için gerekli toplam zaman dilimi (blok gecikmesi) T olmak üzere kanal katsayıları ($h_{l,t}$) oluşturulur.

$$y_{l,t} = h_{l,t} \cdot s_{l,t} + n_{l,t}, \quad t = 1, \dots, T \text{ ve } l = 1, \dots, L \quad (3.1)$$

Bunun için Gauss dağılımına sahip ortalaması 0, değişintisi 1 olan $t = 1, \dots, T$ ve $l = 1, \dots, L$ olmak üzere veri çiftleri $(re_{l,t}^h, im_{l,t}^h)$ ve $(re_{l,t}^n, im_{l,t}^n)$ üretilir. Bu veri çiftleri kullanılarak (3.2) ve (3.3) ile verilen katsayılar oluşturulur.

$$h_{l,t} = \frac{1}{\sqrt{2}}(re_{l,t}^h + j \cdot im_{l,t}^h), \quad t = 1, \dots, T \text{ ve } l = 1, \dots, L \quad (3.2)$$

$$n_{l,t} = \frac{1}{\sqrt{2}}(re_{l,t}^n + j \cdot im_{l,t}^n), \quad t = 1, \dots, T \text{ ve } l = 1, \dots, L \quad (3.3)$$

Adım 3:

Algoritmaya girdi olarak verilen $\bar{\gamma}$ değeri ile (3.2)'de hesaplanan $h_{l,t}$ değeri kullanılarak anlık SNR değerleri ($\gamma_{l,t}$) oluşturulur.

$$\gamma_{l,t} = \|h_{l,t}\|^2 \cdot \bar{\gamma}, \quad t = 1, \dots, T \text{ ve } l = 1, \dots, L \quad (3.4)$$

Tüm paketler hedef birime ulaşıncaya kadar ($TB_L < k$), diğer bir deyişle ($t < T$) olduğu sürece aşağıda verilen Adım 4, Adım 5 ve Adım 6 adımları blok halinde alt indis t bir arttırılarak sırayla tekrar edilir.

Adım 4:

Bu aşamada Çizelgeleme Yöntemleri bölümünde anlatılan yöntemlerden hangisi kullanılmaktaysa, ilgili yöntem için verilen açıklamalar doğrultusunda, algoritma girdileri TB_{\max} ve γ_{th} ile Adım 3'te oluşturulan $\gamma_{l,t}$ değerleri kullanılarak t zaman diliminde hangi birim veya birimlerin gönderim yapacağına karar verilir.

Adım 5:

Gönderim yapacak birimlerden her biri tampon belleğinde gönderim sırası gelen paketteki bitleri sembollere ($s_{l,t}$) dönüştürür. BPSK kiplenim tipi kullanıldığı durumda bit 1 ve bit 0 sırasıyla 1 ve -1 olarak sembolize edilirler.

Adım 6:

(3.1)'de verildiği gibi semboller ilgili sekmedeki kanaldan geçirilirler. Tam kanal durumu (perfect CSI) $h_{l,t}$ 'yi bilen alıcı birim (3.5)'deki gibi kanal denkleştirme yapar.

$$\hat{y}_{l,t} = \frac{y_{l,t}}{h_{l,t}} = \frac{h_{l,t}s_{l,t} + n_{l,t}}{h_{l,t}} = s_{l,t} + \tilde{n}_{l,t} \quad (3.5)$$

Burada $\tilde{n}_{l,t} = n_{l,t} / h_{l,t}$ kanal katsayısı ile ölçeklendirilmiş gürültüyü ifade etmektedir ve alıcı birimde sembollerin hatalı çözümlenme olasılığını yaratan bileşendir. Alıcı birim daha sonra Sıfır-Bir Kararıyla Birleştirme yaparak semboldeki bitlere karar verir. Bu işlemler sonucunda gönderici birimin/birimlerin tampon belleğinde eksilme olurken, alıcı birimlerde de artış olmaktadır.

Adım 7:

Bu adıma gelindiğinde hedef birim kaynaktan gönderilen tüm paketleri almış ve $[\hat{p}_1 \ \hat{p}_2 \ \dots \ \hat{p}_k]$ şeklinde çözümlenmiştir. Tüm iletiler tamamlandığı için, analizler için ihtiyaç duyulan veriler bu aşamada oluşturulur.

Uçtan uca bit hata olasılığını hesaplamak için kaynaktan çıkan $[p_1 \ p_2 \ \dots \ p_k]$ dizisi ile hedefte çözümlenen $[\hat{p}_1 \ \hat{p}_2 \ \dots \ \hat{p}_k]$ dizisi karşılaştırılır. Dizilerdeki farklı eleman sayısı, toplam bit sayısına bölünerek istenen sonuç elde edilir.

Düzgelenmiş akış hızı hesap yöntemi (3.6)'da verilmiştir.

$$D. \text{ akış hızı} = \frac{k \text{ paketin Geleneksel yöntemle iletimi için gerekli TS sayısı}}{k \text{ paketin alternatif yöntemle iletimi için gerekli TS sayısı}} \quad (3.6)$$

Her bir birimin kullandığı ortalama tampon bellek kapasitesini hesaplamak için, birimlerin tüm zaman dilimlerinde belleklerinde tuttukları paket sayılarının toplamı, tüm paketlerin kaynaktan hedefe aktarımı için geçen toplam zaman dilimine bölünür.

Her bir birimin kullandığı maksimum tampon bellek kapasitesi, kaynaktan hedefe tüm paketlerin gönderildiği zaman zarfında, birimlerin belleklerinin ulaştığı maksimum kapasiteyi ifade eder. Bu durumu yaratmak için algoritma girdilerinden TB_{\max} oldukça büyük (örneğin sistemde iletilecek toplam paket sayısı k kadar) girilir.

Ortalama paket gecikme süresi, sistemdeki tüm paketlerin kaynak birimden hedef birimi ulaşması için geçen sürenin zaman dilimi biriminden ortalamasını ifade eden ölçüttür.

Maksimum paket gecikme süresi ise özellikle gerçek zamanlı (real-time) ve gerçek zamana yakın (near real-time) uygulamalarda önem arz eden bir parametredir. Kaynak birimden çıkan bir paketin maksimum ne kadar sürede (zaman diliminde) hedef tarafından alındığını ifade etmektedir.

3.1 Sistemin Uçtan Uca Bit Hata Olasılığı Analizi

Uçtan uca bit hata olasılığı, kaynak birimden gönderilen sonlu sayıdaki paketin içerdiği bitlerin hedef birim tarafında ne kadarlık bir hata oranı ile çözümlendiğini gösterir. Birimi yoktur ve yüzde (%) olarak ifade edilir. Genelde sistem tasarımları, sistem gereksinimleri doğrultusunda öngörülen belirli bir BER değerini sağlayacak şekilde, diğer sistem parametrelerinin düzenlenmesi şeklinde gerçekleştirilir.

Rayleigh sönümlenmeye maruz kalan bir sekmede(l) BPSK kiplenim tipi kullanıldığında, gürültü izgesel yoğunluğu N_0 ve sembol enerjisi $E_{s,l}$ (BPSK için her bir sembolde bir bit bulunduğu için bit enerjisi sembol enerjisine eşittir) olmak üzere, bit hata olasılığı ($P_{b,l}$) aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [39].

$$P_{b,l} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{s,l}}{\bar{\gamma}_{s,l} + 1}} \right), \quad \bar{\gamma}_{s,l} = \frac{E_{s,l}}{N_0} \quad (3.7)$$

L sekmeden oluşan bir sistemde, Geleneksel Çizelgeleme Yöntemi kullanıldığında uçtan uca bit hata olasılığı (P_E), sekmelerdeki sönümlenmeler

birbirinden bağımsız olduğu için, her bir sekmedeki $P_{b,l}$ değeri yeterince küçükse yaklaşık olarak (3.8)'deki gibi ifade edilebilir. Aynı bit üzerinde çift sayıda hata oluşursa, hatalar birbirini telafi edecek ve alıcı bu biti doğru çözümlenecektir. Ancak bu olasılık gözardı edilebilir düzeydedir. Örneğin, tek bir sekmedeki bit hata olasılığı 10^{-3} ise, iki sekmede birden hata olma olasılığı 10^{-6} olacaktır. $10^{-6} \ll 10^{-3}$ olduğu için, bu olasılık ihmal edilebilir.

$$P_E = \sum_{l=1}^L P_{b,l} \quad , P_{b,l} \ll 1 \quad (3.8)$$

Tüm sekmelerdeki sembol enerjilerinin birbirine eşit olduğu varsayıldığında, sekmelerdeki bit hata olasılıkları da birbirine eşit olacaktır. Her bir sekmedeki bit hata olasılığını P_b ile ifade edersek (3.8)'deki ifade aşağıdaki hale gelir.

$$P_E = L \cdot P_b \quad (3.9)$$

(3.9)'dan görüldüğü üzere, sistemdeki sekme sayısındaki artışa bağlı olarak uçtan uca bit hata olasılığı doğrusal olarak artmaktadır.

Merkezi Çizelgeleme Yöntemi'nde tüm sekmeler içinden tek bir sekmede iletim yapılır. Burada ölçüt, o sekmedeki alıcı ve verici birimlerin tampon bellek durumlarının uygunluğu ve sekmenin anlık SNR değerinin tüm sekmeler içinde en büyük olan olmasıdır. Dağıtık Çizelgeleme'de ise, tüm sekmeler içinden en iyi durumda olan sekme seçilemediği, bunun yerine her bir alt gruptaki en uygun birim seçildiği için bir eşik SNR değeri kullanılarak, sistem başarımının belirli bir seviyenin üstünde kalması sağlanır.

Tüm alıcıların kanal durum bilgisine sahip olduğu gözönünde bulundurulursa, alıcılar için kanallar Rayleigh sönümlenen kanal olmaktan çıkar ve AWGN kanala dönüşürler. Bu bağlamda, eşik SNR değeri belirlenirken, kiplenim tiplerininin AWGN kanaldaki bit hata olasılığı başarımlarını irdelemek gerekir. BPSK, QPSK ve 16QAM kiplenim tipleri için bit hata olasılıkları sırasıyla (3.11), (3.12) ve (3.13) ile ifade edilmiştir [40]. Bu denklemlerde kullanılan $Q(x)$ fonksiyonu (3.10) ile ifade edilir ve ortalaması 0, değışintisi 1 olan Gaussian olasılık yoğunluk işlevine sahip bir rassal süreçten alınan tek bir örneğin x 'e eşit veya daha büyük olma olasılığını verir.

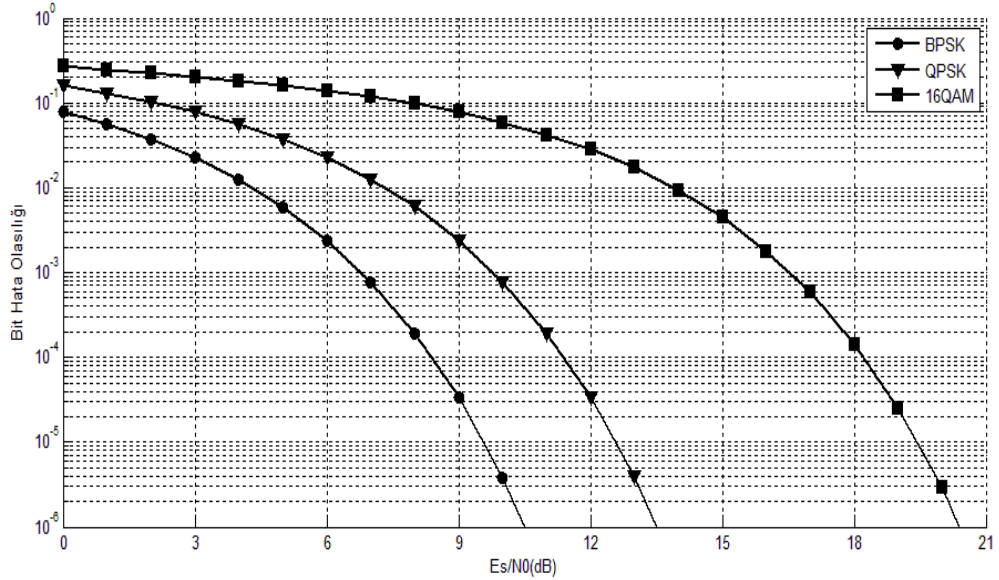
$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt, \quad x \geq 0 \quad (3.10)$$

$$P_b^{BPSK} = Q(\sqrt{2\gamma_s}), \quad \gamma_s = \frac{E_s}{N_0} \quad (3.11)$$

$$P_b^{QPSK} = Q(\sqrt{\gamma_s}), \quad \gamma_s = \frac{E_s}{N_0} \quad (3.12)$$

$$P_b^{16QAM} = \frac{1}{4} \left[Q\left(\sqrt{\frac{\gamma_s}{5}}\right) + Q\left(3\sqrt{\frac{\gamma_s}{5}}\right) \right] + \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{\gamma_s}{5}}\right), \quad \gamma_s = \frac{E_s}{N_0} \quad (3.13)$$

Şekil 3.1'de (3.11), (3.12) ve (3.13) kullanılarak hesaplanan farklı kiplenim tiplerininin AWGN kanal için bit hata olasılıkları verilmiştir. Bu şekil kullanılarak, her bir kiplenim tipi için, hedeflenen BER değerine ulaşmak için kullanılması gereken eşik SNR değerleri bulunabilir. Örneğin; QPSK kiplenim tipi kullanılırken BER değeri 10^{-5} olarak hedeflenmişse, anlık SNR değeri 13 dB üzerinde iken iletim yapılması istenen başarıyı garanti edecektir.



Şekil 3.1 AWGN Kanalda Farklı Kiplenim Tiplerinin Bit Hata Olasılıkları

Bununla birlikte, eğer kiplenim tipi uyarlamalı olarak seçilecekse kiplenim tipini değiştirmek için kullanılacak SNR değerleri aynı şekil kullanılarak bulunabilir. Tablo 3.1’de, her bir sekmede BER hedefi 10^{-3} olduğunda veya başka bir deyişle (3.9) doğrultusunda L sekmeli bir sistemde uçtan uca bit hata olasılığı hedefi $L \cdot 10^{-3}$ olduğunda uyarlamalı kiplenim için kullanılacak SNR eşiklerine yer verilmiştir. Uyarlamalı kiplenimin BER başarımı büyük ölçüde hedeflenenden daha iyi olacaktır. Örnek vermek gerekirse, SNR değeri 7 dB olduğunda kiplenim tipi olarak BPSK kullanılacak ve BER değeri 10^{-3} olacaktır. SNR değeri 7 dB’den 10 dB’ye doğru artarken hala BPSK kullanıldığı için Şekil 3.1’den görüldüğü üzere BER başarımı artmaktadır. SNR değeri 10 dB olduğunda kiplenim tipi olarak QPSK kullanılır ve BER değeri tekrar 10^{-3} olur. SNR değerinin 7 dB’nin altında olduğu zaman dilimlerinde hedeflenen BER değerine BPSK kiplenim tipi ile dahi ulaşamadığı için iletim yapmama seçeneği tercih edilebilir.

Tablo 3.1 Kiplenim Tipi Seçimi İçin Kullanılan Eşik SNR Değerleri (BER=0.001)

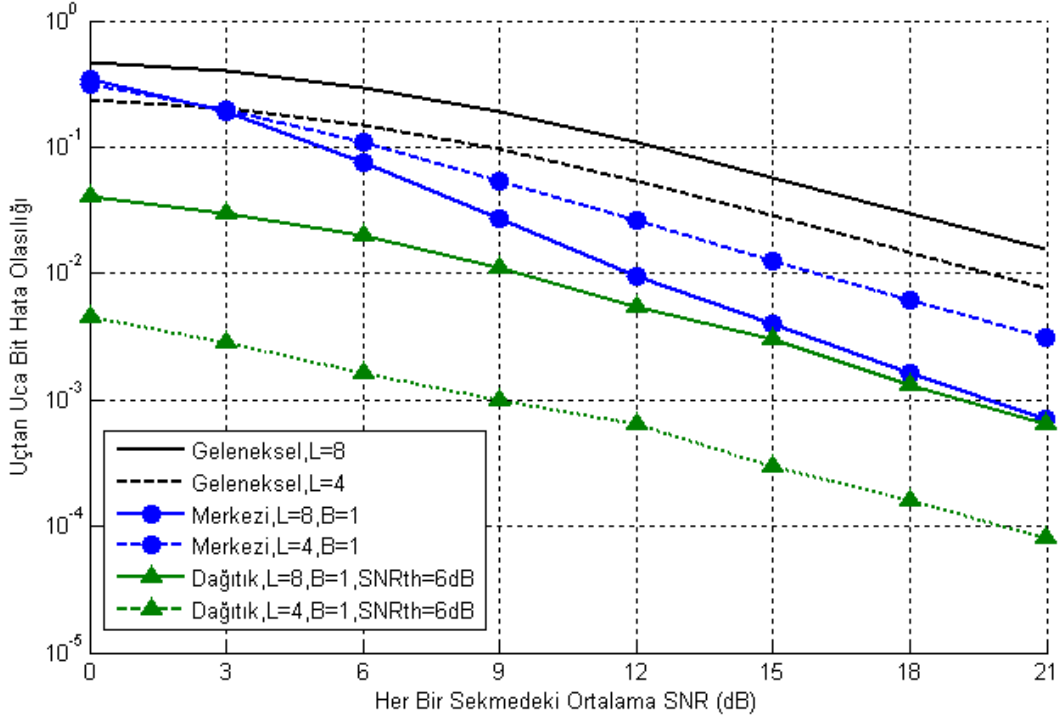
Kiplenim Tipi	SNR Bandı (E_s/N_0)
BPSK veya gönderim yapılmaz	SNR < 7 dB
BPSK	7 dB \leq SNR < 10 dB
QPSK	10 dB \leq SNR < 17 dB
16QAM	SNR \geq 17 dB

İzgesel verimlilik bir iletim sinyalinin birim band genişliği başına taşıdığı bit sayısı olarak tanımlandığından, uyarlamalı kiplenim sayesinde bit hata olasılığı açısından istenen başarımlar sağlandığı gibi aynı zamanda izgesel verimlilik artırılarak daha yüksek akış hızlarına erişilmektedir. Hiçbir kiplenim tipi tek başına BER başarımından ödün vermeden yüksek izgesel verimliliğe sahip değildir.

3.1.1 Sekme Sayısının Etkisi

Şekil 3.2’de, benzetimler sonucu elde edilen, farklı sekme sayısına sahip sistemlerdeki bit hata olasılığı başarımlarına yer verilmiştir. Çizelgeleme yöntemlerinin üçünde de birimlerin tampon bellek kapasiteleri Geleneksel

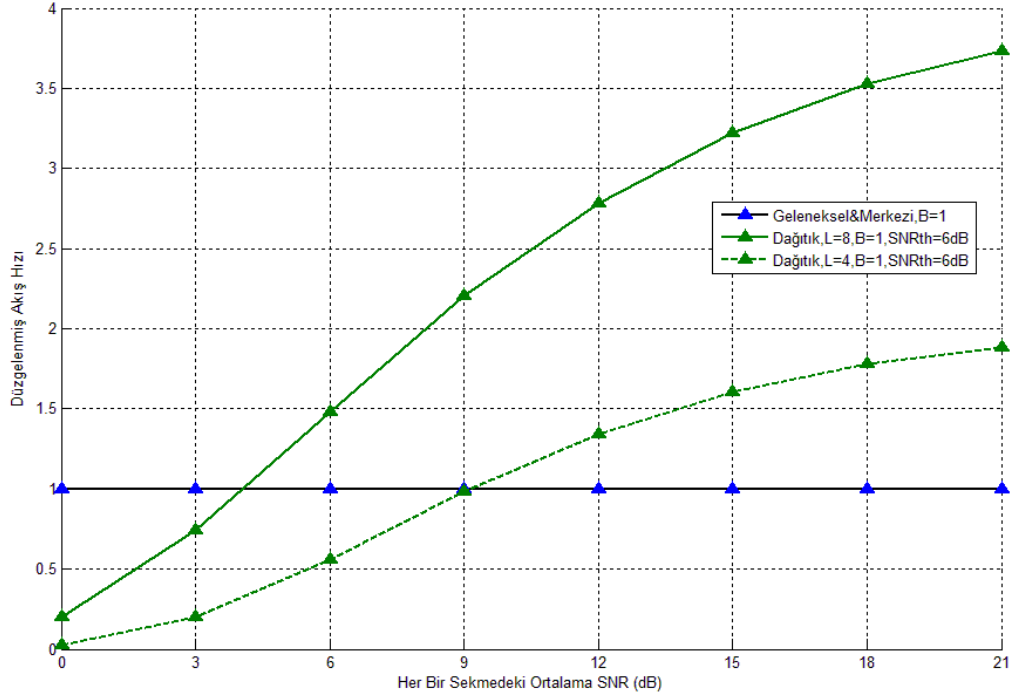
Yöntem'deki gibi sadece 1 paket tutabilecek şekilde tanımlanmıştır. Dağıtık Yöntem için eşik SNR değeri olarak 6 dB kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Sistemdeki Sekme Sayısının BER Başarımına Etkisi

Sonuçları yorumlamak gerekirse, Geleneksel Yöntem'de sekme sayısı arttıkça (3.9) ile örtüşür şekilde sistemin uçtan uca bit hata olasılığı artmaktadır. 8-sekmeli bir sistemde 4-sekmeli bir sistemin BER başarımını yakalamak için verici antenlerinin çıkış gücünü 2 katına (3 dB) çıkarmak gerekmektedir. Merkezi Yöntem'de ise sekme sayısı arttıkça seçim yapılacak sekme çeşitliliği arttığı için bit hata olasılığı azalmaktadır. Bu Merkezi Yöntem'in sağladığı en büyük avantajdır. Dağıtık yöntemde ise sistemin seri bağlanmış gruplardan oluştuğu düşünüldüğünde, her yeni sekme grup sayısının artmasına neden olacaktır. Bu yüzden Geleneksel Yöntem'e benzer şekilde sekme sayısı arttıkça bit hata olasılığı başarımı kötüleşmektedir. Dağıtık Yöntem kullanılan 8-sekmeli bir sistem için BER başarımı 4-sekmeli bir sisteme nazaran daha kötü olmasına rağmen, hala Merkezi Yöntem'den daha iyi bir başarımla sergilemektedir. Merkezi Yöntem ise her zaman için Geleneksel Yöntem'den daha iyi bir başarıma sahiptir.

BER başarımı grafiklerini tek başına yorumlamak yerine, ilintili olarak, çizelgeleme yöntemlerinin aynı koşullar altındaki düzgelenmiş akış hızı başarımlarına yer verilen grafiklerle birlikte yorumlamak daha doğru olacaktır. Bu bağlamda, Şekil 3.2'nin değerlendirmesine Şekil 3.3 dahil edilebilir.



Şekil 3.3 Sistemdeki Sekme Sayısının Düzgelenmiş Akış Hızı Başarımına Etkisi

Geleneksel ve Merkezi yöntemler sekme sayısı ne olursa olsun bir zaman diliminde sadece bir birimin iletim yapmasına izin vermektedirler. Ancak Dağıtık Yöntem kullanıldığında, Şekil 3.3'ten görüldüğü üzere, yöntemin doğası gereği sekme sayısı artışıyla birbirinden ayrılmış şekilde iletim yapabilecek birim sayısı arttığı için düzgelenmiş akış hızı da artmaktadır. Buradan yola çıkarak, belirli koşullar altında, Dağıtık Yöntem'in hem bit hata olasılığı başarımı hem de düzgelenmiş akış hızı başarımı açısından diğer yöntemlerden üstün olduğu sonucuna varılabilir. Örneğin, her bir sekmedeki ortalama SNR değeri 12 dB olduğunda; Dağıtık Yöntem'in hem 8-sekmeli hem 4-sekmeli sistemlerde bit hata olasılığı Merkezi Yöntem'den daha düşük olduğu, aynı zamanda daha yüksek akış hızına sahip olduğu sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'den görülebilir. İlerleyen

bölümlerde daha ayrıntılı şekilde incelenen paket gecikme süreleri de akış hızındaki artışa paralel olarak azalmaktadır.

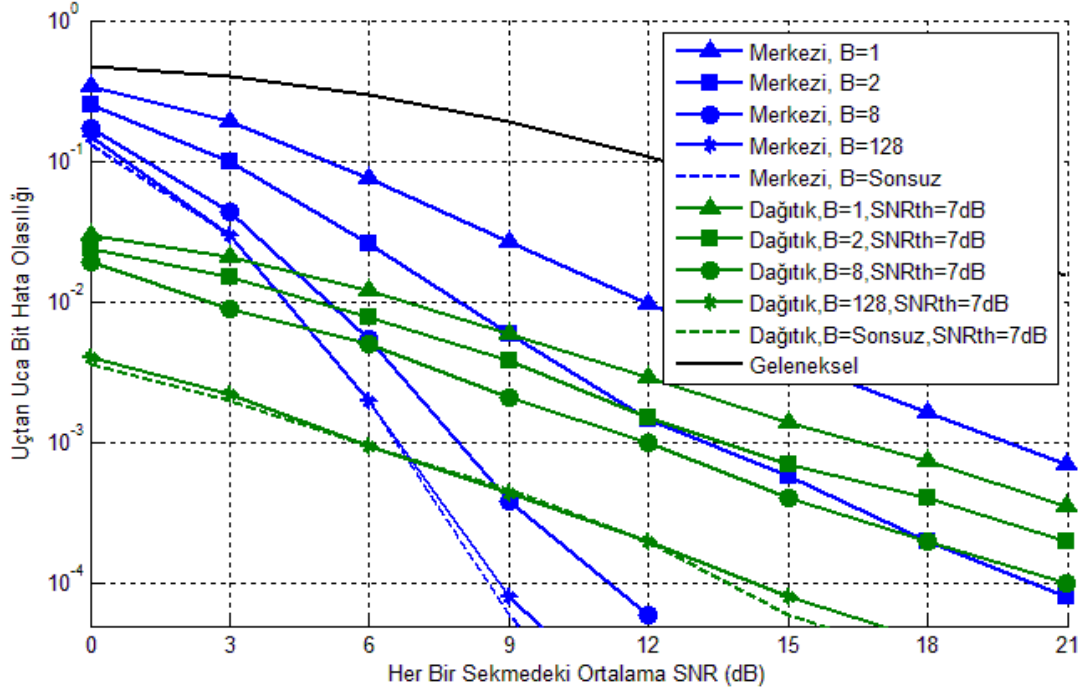
3.1.2 Tampon Bellek Kapasitesinin Etkisi

Birimlerdeki tampon bellek kapasitesinin uçtan uca bit hata olasılığına olan etkisini belirlemek için yapılmış benzetimlerde 8-sekmeli bir sistem kullanılmış ve birimlerdeki tampon bellek kapasiteleri maksimum 1, 2, 8, 128 ve sonsuz paket tutabilecek şekilde tanımlanmıştır. Dağıtık Yöntem için eşik SNR değeri 7 dB olarak kullanılmıştır.

Merkezi Yöntem'de her bir birimdeki tampon bellek kapasitesi arttırıldıkça çeşitlilik kazancı artarak sonsuz kapasiteli tampon bellek ile sağlanan BER alt-sınır başarımına yaklaşılr. Aslında tampon bellek kapasitesini çok fazla arttırmadan da ortalama SNR'a bağlı olarak oldukça iyi başarımlar sağlanabildiği Şekil 3.4'ten görülebilmektedir. Örneğin; her bir sekmedeki ortalama SNR'ın 18 dB olduğu durumda BER hedefi 10^{-3} olarak tutulursa, sadece 2 paketlik bir tampon bellek bu başarımları sağlayacaktır. Öte yandan, sekmelerdeki ortalama SNR değerinin yüksek tutulmadığı durumlarda birimlerdeki tampon bellek kapasiteleri arttırılarak istenen başarımlar yeniden yakalanabilir. Tampon bellek kapasiteleri ne kadar az olursa olsun, sekmelerdeki birbirinden bağımsız sönümlenmenin getirisi olarak Merkezi Yöntem her durumda Geleneksel Yöntem'den iyi bir BER başarımına sahiptir. Ek bir tampon bellek kullanımının olmadığı durumda dahi (TB = 1 paket), 8-sekmeli bir sistemde, Merkezi Yöntem'in Geleneksel Yöntem'e göre 7 dB civarında bir SNR kazancı olduğu Şekil 3.4'ten görülebilmektedir.

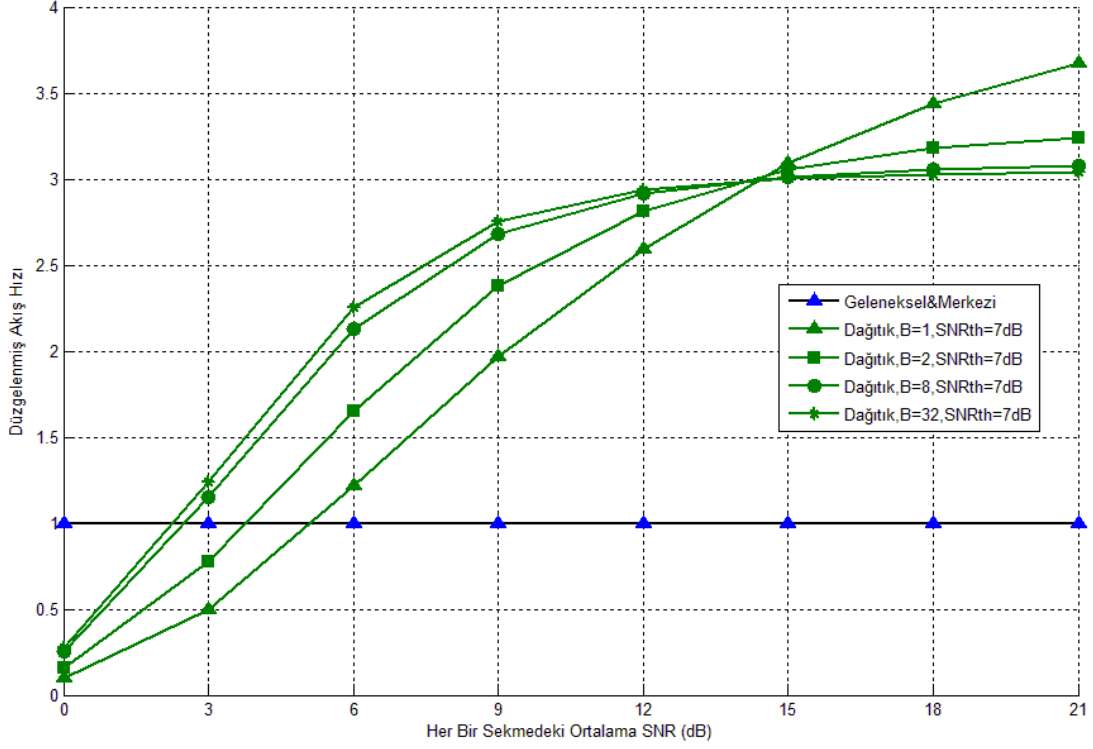
Dağıtık Yöntem'de de tampon bellek kapasitelerindeki artış BER başarımında bir artış getirmektedir, ancak bu artış Merkezi Yöntem'deki kadar yüksek olmamaktadır. Bu sonuç aslında tahmin edilebilir bir sonuçtur, çünkü Merkezi Yöntem'de herhangi bir zaman dilimi için tek bir birim iletim hakkına sahiptir ve bellek kapasitelerin artışıyla beraber seçilecek en iyi durumdaki birim direk olarak sistemin başarımını arttıracaktır. Dağıtık Yöntem'de ise bellek kapasiteleri arttırıldığında, herhangi bir zaman dilimi için, grup bazında BER başarımı iyileşmeleri gerçekleşecek ancak her gruptan bir birim aynı anda iletim yapabileceği için bunun tüm sisteme yansması Merkezi Yöntem kadar etkin olamayacaktır. Tampon bellek kapasitesi artışı ile Dağıtık Yöntem'in BER başarımı

Merkezi Yöntem kadar artmasa da başarımının hala Merkezi Yöntem'den iyi olabileceği (örneğin TB=1 ve TB=2 durumları için) unutulmamalıdır. 8 paketlik tampon bellekler kullanıldığında ise sekmelerin ortalama SNR değerleri 6 dB ve üzerinde olduğunda Merkezi Yöntem'in daha başarılı olduğu Şekil 3.4'ten görülmektedir.



Şekil 3.4 Bellek Kapasitesinin 8-Sekmeli Bir Sistemde BER Başarımına Etkisi

Şekil 3.5'te 8-sekmeli bir sistem için Dağıtık Yöntem'in düzgelenmiş akış hızı başarımına tampon bellek kapasitesinin etkisine yer verilmiştir. Beklendiği üzere tampon bellek kapasiteleri arttığı durumda, birimlerin tampon bellek doluluk/boşluk kısıtlarından ötürü iletim yapmama olasılıkları azalacağı için, düzgelenmiş akış hızları da artmaktadır. Örneğin; her bir sekmedeki ortalama SNR'ın 9 dB olduğu durumda 1,2 ve 8 paketlik tampon bellek kullanımlarına karşılık düzgelenmiş akış hızları sırasıyla 2, 2.4 ve 2.7 olmaktadır. Sonraki bölümlerde daha ayrıntılı değinildiği üzere, bu artış aynı zamanda sistemdeki gecikmelerin de azalması anlamına gelmektedir. Yüksek SNR değerlerinde ise farklı tampon bellek kapasitelerinin düzgelenmiş akış hızı başarımları doyuma ulaşır ve birbirine oldukça yakındır.



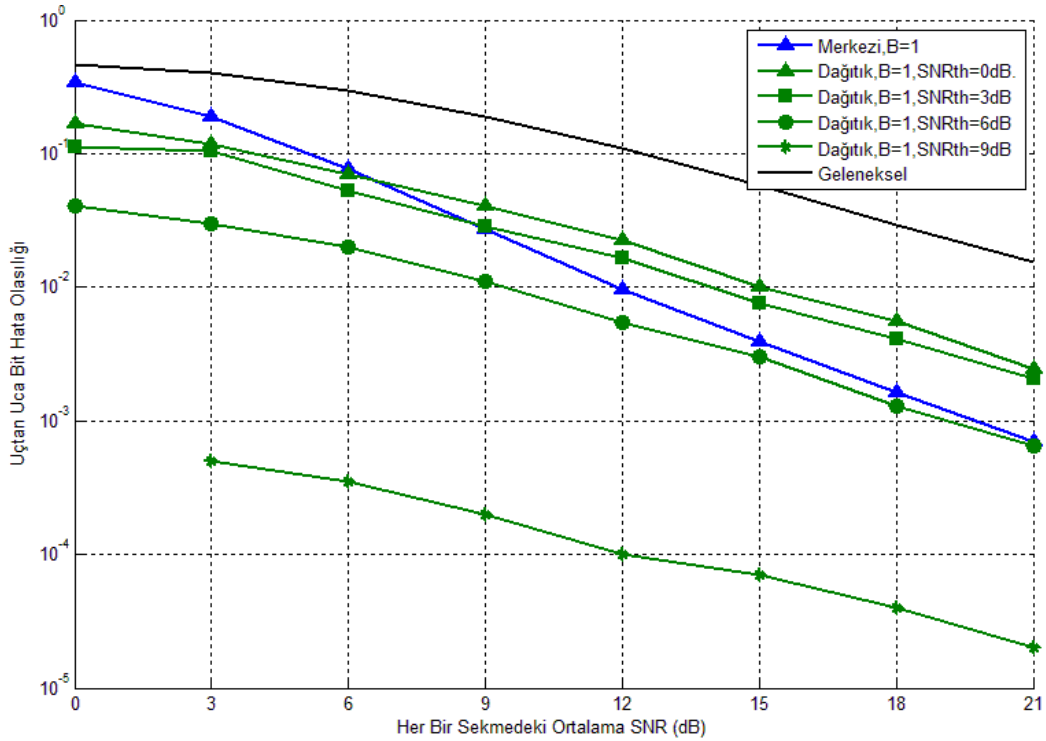
Şekil 3.5 Bellek Kapasitesinin 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Düzgelenmiş Akış Hızı Başarımına Etkisi

Sonuç olarak, tampon bellek kapasitelerindeki artışın Dağıtık Yöntem'in hem BER hem düzgelenmiş akış hızı başarımlarına olumlu etkisi olduğu söylenebilir. Bununla birlikte düşük tampon bellek kapasitelerin dahi yeterli başarımları sağlayabileceği görülmektedir.

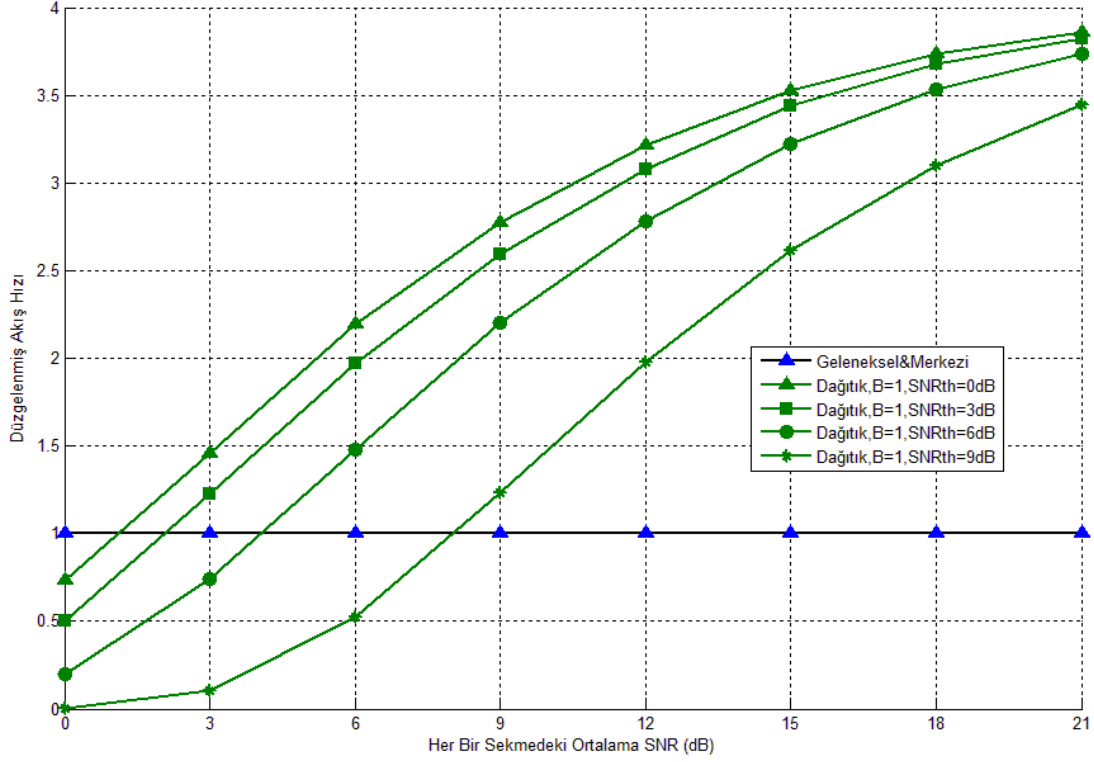
3.1.3 Eşik SNR Değerinin Etkisi

Yapılan benzetimler esnasında bu tez çalışmasında önerilen dağıtık çizelgeleme yöntemi için farklı eşik SNR değerleri kullanılmıştır. Böylece, farklı eşik SNR değerlerinin başarıma etkileri ve benzetim sonuçlarının ne denli anlamlı oldukları gözlenebilmiştir. Nitekim eşik SNR değeri çok yüksek tutulursa (eşik SNR'ı sağlayarak yapılacak iletim sayısı azalacağı için), özellikle sekme sayısının fazla olduğu sistemlerde uçtan uca bit hatası yaratmak oldukça zorlaşmaktadır. Bu durumda anlamlı sonuçlar elde edebilmek için gerekli benzetim süreleri çok fazla uzamaktadır. Bu bölümde verilen şekillerin bazılarında çok düşük ve yüksek ortalama SNR değerleri için bu nedenlerle çizim yapılmamıştır.

Şekil 3.6'da birimlerinde tek bir paket saklayabilecek kapasitede tampon bellek bulunan 8-sekmeli bir sistem için eşik SNR değerindeki değişimin Dağıtık Yöntem'in BER başarımına olan etkisi görülmektedir. Açık olduğu üzere, eşik SNR değerindeki artış hatalı iletimlerin sayısını ve dolayısıyla bit hata olasılığını düşürmektedir. Ancak BER değerindeki bu iyileşme beraberinde Şekil 3.7'de görüldüğü gibi düzgelenmiş akış hızında bir gerilemeyi getirecektir. Ancak, bu gerilemeye rağmen, yüksek ortalama SNR değerleri için akış hızının Geleneksel Yöntem'e ve Merkezi Yöntem'e göre halen yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek eşik SNR değeri kullanmanın diğer kötü sonucu ise, paket gecikme sürelerinde yaşanan artıştır.

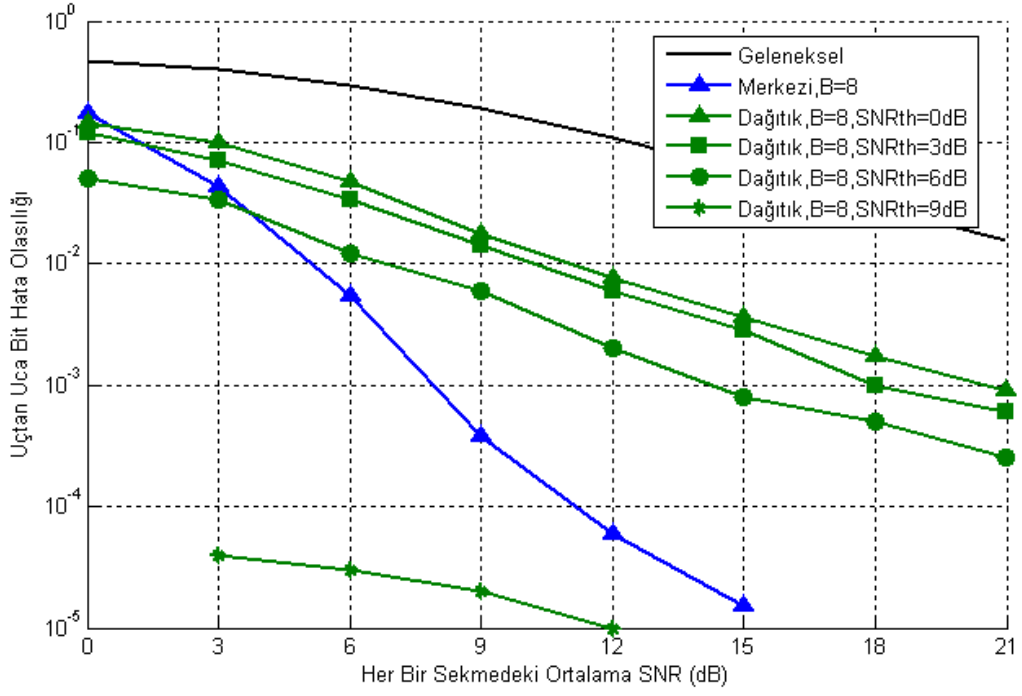


Şekil 3.6 Eşik SNR Değerinin 8-Sekmeli Bir Sistemdeki BER Başarımına Etkisi (TB=1 paket)

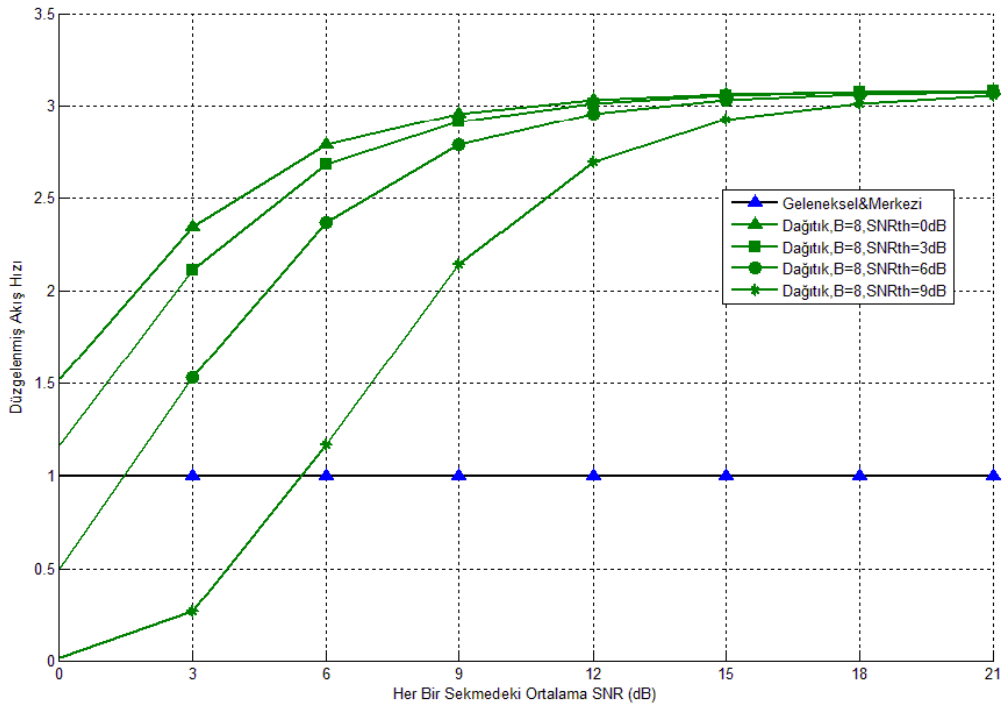


Şekil 3.7 Eşik SNR Değerinin 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Düzeltilmiş Akış Hızı Başarımına Etkisi (TB=1 Paket)

Benzer şekilde 8-sekmeli bir sistem için tampon bellek kapasiteleri 8 paket olarak tanımlanarak yapılan benzetimler sonucu elde edilen BER ve düzeltilmiş akış hızı başarımlarına sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da yer verilmiştir. Bir paket kapasiteli tampon bellek kullanımında verilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Daha önce belirtildiği üzere tampon bellek kapasitesinin BER başarımına etkisi Merkezi Yöntem için daha fazladır. Bu yüzden, tampon bellek kapasitesindeki artışla birlikte Merkezi Yöntem'in bit hata olasılığı başarımını Dağıtık Yöntem ile yakalayabilmek için eşik SNR değerini arttırmak gerektiği Şekil 3.8'den görülmektedir.



Şekil 3.8 Eşik SNR Değerinin 8-Sekmeli Bir Sistemdeki BER Başarımına Etkisi (TB=8 paket)



Şekil 3.9 Eşik SNR Değerinin 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Düzgelennmiş Akış Hızı Başarımına Etkisi (TB=8 Paket)

3.2 Sistemin Ortalama ve Maksimum Paket Gecikme Süreleri Analizi

Gecikme analizi yaparken iki farklı metrik tanımını gözönünde bulundurmakta fayda görülmektedir. Bunlardan blok gecikmesi belirli sayıdaki paketten oluşan bir veri bloğunun kaynak birimden hedef birime taşınması için gereken toplam zaman dilimi olarak tanımlanır. İkinci metrik olan paket gecikmesi ise tek bir paketin kaynak birimden hedef birime iletilmesi için geçen süreyi zaman dilimi biriminden ifade etmektedir. Çizelgeleme yöntemlerinin paket gecikme başarımları minimum, maksimum ve ortalama paket gecikmesi metrikleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Blok gecikmesi açısından Geleneksel Yöntem ve Merkezi Yöntem eşit başarıma sahiptir. Her iki yöntemde de L sekmeli bir sistemde M paketten oluşan bir veri bloğunu kaynaktan hedefe iletmek için LM zaman dilimi gerekmektedir. Aralarındaki fark, Geleneksel Yöntem'de her L zaman diliminde, Merkezi Yöntem'de ise ortalama olarak her L zaman diliminde bir paketin hedefe ulaştırılmasıdır. Burada Merkezi Yöntemi'nin çok daha iyi bir bit hata olasılığı başarımlı olmasının yanında, blok gecikmesi başarımında da Geleneksel Yöntemi'nin gerisinde kalmadığı görülmektedir. Blok gecikmesi

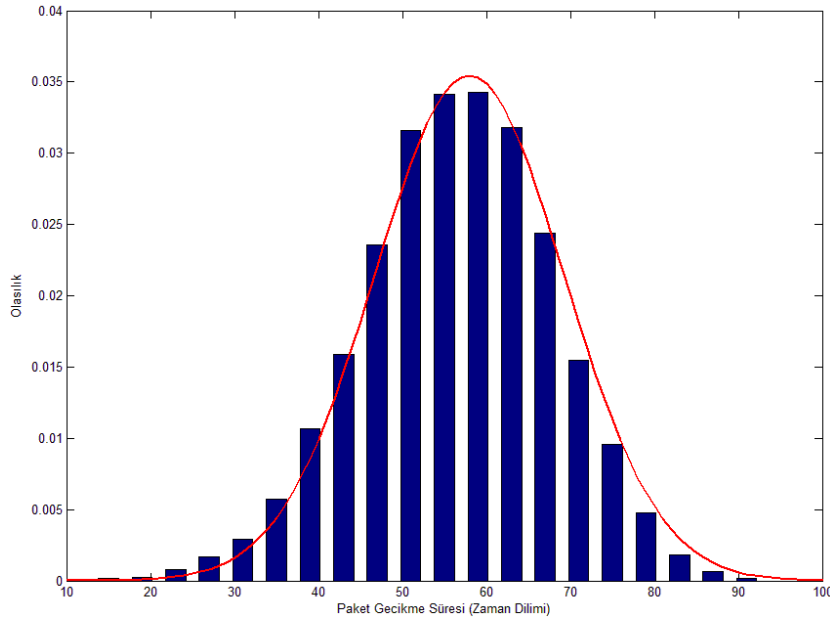
$$\text{Blok gecikmesi} = \frac{LM}{\text{Düzgelenmiş akış hızı}} \quad (3.14)$$

şeklinde verilebilir. Geleneksel ve merkezi yöntemlerin düzgelenmiş akış hızları 1'e eşittir. Buna karşılık, dağıtık yöntemde düzgelenmiş akış hızı, özellikle ortalama SNR değerinin yeterince büyük olduğu veya eşik SNR değerinin yeterince küçük olduğu durumlarda 1'den büyük bir değer aldığı için, Dağıtık Yöntemi'nin blok gecikmesi başarımının diğer iki yönteme göre üstün olduğu söylenebilir. Aynı anda birden fazla iletimin yapılabildiği bu yöntemde sezgisel olarak beklenen, blok gecikmesi başarımının yüksek olmasıdır.

Özellikle gerçek-zamanlı uygulamalarda (ses, görüntü iletimi vb.) paket gecikmesinin sistem isterlerince belirlenen bir değer altında olması istenmektedir. Bu açıdan ortalama ve maksimum paket gecikmeleri önem arz eder. Öncesinde; minimum paket gecikmesi başarımlarına değinmek gerekirse, her üç yöntem için de L sekmeli bir sistemde tek bir paketi kaynaktan hedefe iletmek için gereken minimum zaman (paketin hiçbir röle birimindeki tampon bellekte bekletilmeden bir sonraki birime aktarıldığı durumda) L zaman dilimidir.

3.2.1 Sekme Sayısının Etkisi

Gecikme sürelerinin histogramları incelendiğinde, özellikle sekme sayısının yüksek olduğu durumlarda, gecikme süresi dağılımının simetrik bir hal aldığı ve Gauss dağılımı ile çok benzeştiği görülmektedir. Örnek vermek gerekirse, Şekil 3.10'da 8-sekmeli, her bir birimde 2 paket tutabilecek kapasitede tampon belleğin olduğu bir sistemde, Merkezi Yöntem kullanıldığında oluşan gecikme süresi dağılımına yer verilmiştir. İlerleyen bölümlerde de benzer şekilde paket gecikmesinin Gaussian olasılık yoğunluk işlevi biçiminden ifade edilmesinden yararlanılmıştır.



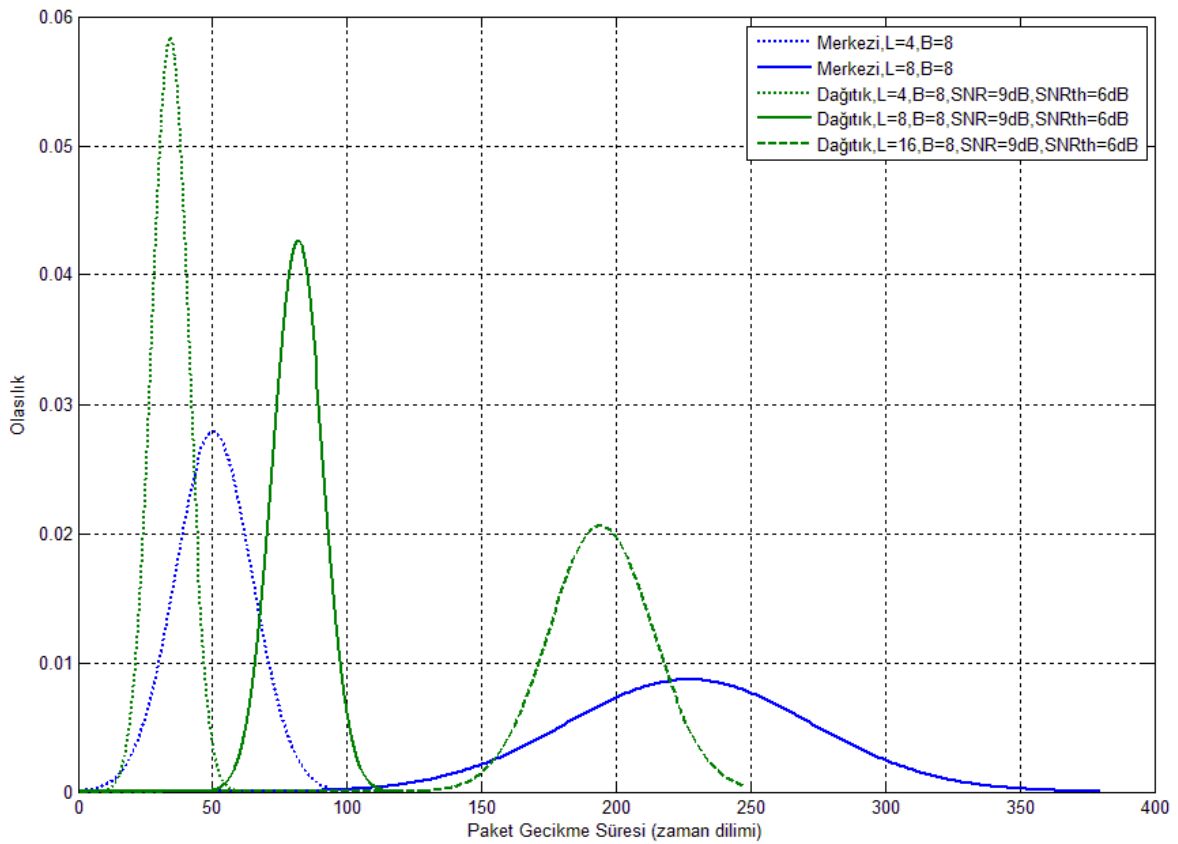
Şekil 3.10 Merkezi Yöntem İçin Paket Gecikme Süresi Histogramının Gaussian Dağılım(Ortalama=57, Standard Sapma= 11) İle Örtüşmesi (Sekme sayısı=8, Bellek Kapasitesi=2 paket)

[21] numaralı çalışmada Merkezi Yöntem için maksimum paket gecikme süresi (G_{\max}), sekme sayısına (L) ve tampon bellek kapasitesine(TB_{\max}) bağlı olarak

$$G_{\max} = TB_{\max} L^2 - TB_{\max} L - L + 2 \quad (3.15)$$

şeklinde verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere maksimum paket gecikme süresi tampon bellek kapasitesiyle doğrusal olarak ilintili iken, sekme sayısı ile karesel olarak ilintilidir. Şekil 3.11'deki benzetim sonuçları (3.15) ile uyum içindedir. Grafikten, Merkezi Yöntem için sekme sayısı 4'ten 8'e çıkarıldığında maksimum paket gecikme süresinin yaklaşık 4 kat arttığı açıkça görülmektedir. Benzer yorum ortalama paket gecikmesi için de yapılabilir. Dağıtık Yöntem için ise maksimum ve

ortalama paket gecikme sürelerinin sekme sayısındaki artışla doğrusal olarak arttığı görülmektedir. 16-sekmeli bir sistemin iki tane 8-sekmeli alt-sistemin seri bağlanmış hali olduğu düşünülüğünde, Dağıtık Yöntem’de bu alt-sistemlerde aynı anda iletim yapılacağı için bu sonuç sezgisel olarak da beklenebilir. 16-sekmeli bir sistemdeki paket gecikmesi Merkezi Yöntemi kullanan 8-sekmeli bir sistemdeki paket gecikmesinden daha az olabilmektedir. Ayrıca aynı grafikten Dağıtık Yöntem’deki gecikme değişiminin Merkezi Yöntem’den daha az olduğu görülmektedir.

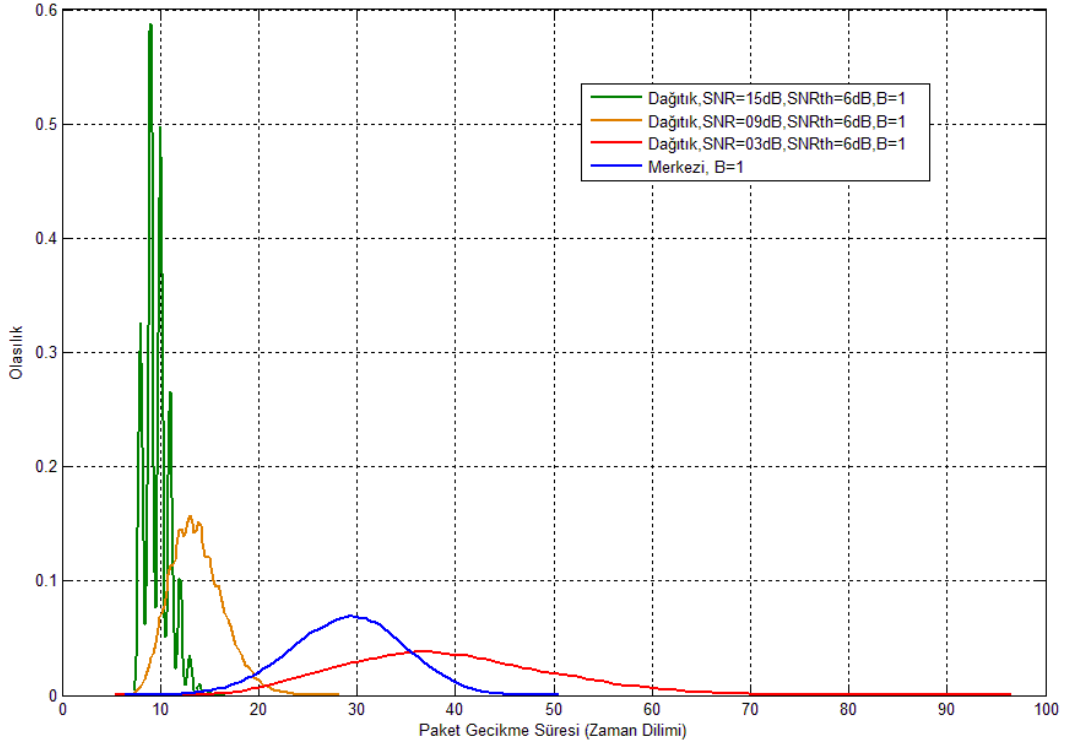


Şekil 3.11 Farklı Sekme Sayıları İçin Paket Gecikme Süresinin Olasılık Yoğunluk İşlevi

3.2.2 Ortalama ve Eşik SNR Değerlerinin Etkisi

Şekil 3.12’de 8-sekmeli bir sistemde Dağıtık Yöntem ve Merkezi Yöntem için paket gecikme süresinin olasılık yoğunluk işlevine yer verilmiştir. Tüm birimlerde tampon bellek kapasitesi 1 paket olarak kullanılmıştır. Dağıtık Yöntem için eşik SNR değeri

6 dB olarak tanımlanırken, her bir sekmedeki ortalama SNR değerinin farklı değerleri için grafik çizdirilmiştir. Bu şekilden, daha önce de ifade edildiği gibi minimum paket gecikmesinin sekme sayısı (8) kadar olduğu görülebilmektedir. Her bir sekmedeki ortalama SNR değerinin 15 dB olduğu durumda dağılımın yaklaşık olarak 10 zaman dilimi etrafında küçük bir değişinti ile konumlandığı görülmektedir. Diğer bir deyişle, kanal durumları iyileştikçe paket gecikme süreleri azalmakta, Dağıtık Yöntem'in başarımı Geleneksel Yöntem'inkine (her zaman 8 zaman dilimi) yaklaşmaktadır. Kanal durumları kötüleştikçe beklendiği üzere paket gecikmesinin hem ortalama değeri hem de değişintisi artmaktadır. Aynı yorumu ortalama SNR değerini sabit tutup, eşik SNR değeri parametresiyle oynayarak da yapmak mümkündür. Burada önemli olan ortalama SNR ile eşik SNR değeri arasındaki farkın azalıp artmasıdır. Merkezi Yöntem için ise ortalama SNR değerinin paket gecikme süresi ile bir ilintisi yoktur. Çünkü, sekmelerin SNR değerleri ne olursa olsun içlerinden bir tanesinde muhakkak iletim yapılmaktadır. Fakat Dağıtık Yöntem'in gecikme süresi başarımı, sekmelerdeki ortalama SNR değerleri yüksek olduğu durumlarda, Şekil 3.12'den görüldüğu üzere göre Merkezi Yöntem'den çok daha iyi olmaktadır.

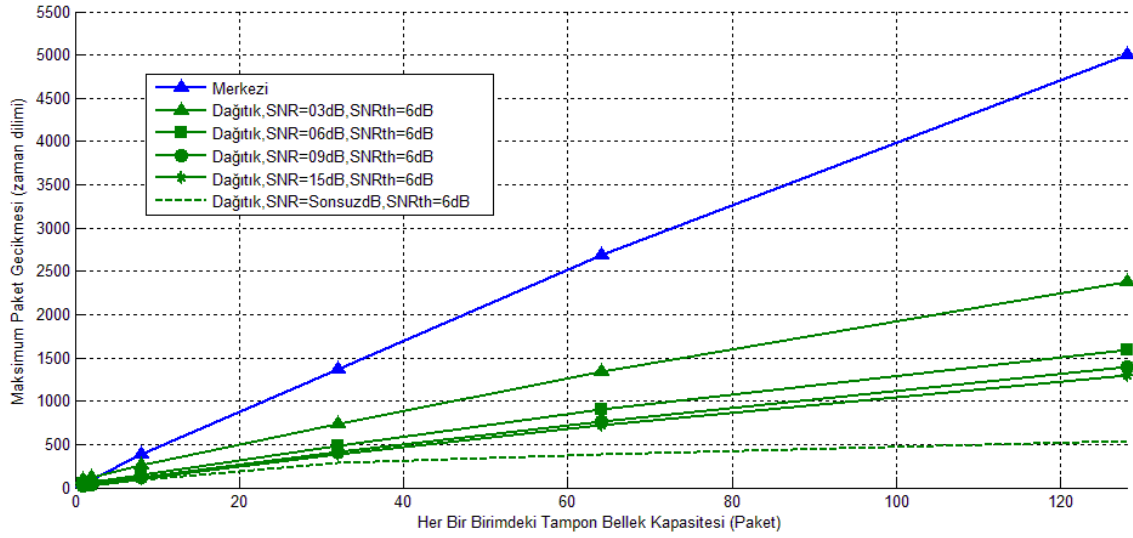


Şekil 3.12 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Farklı Ortalama SNR Değerleri İçin Paket Gecikme Süresinin Olasılık Yoğunluk İşlevi

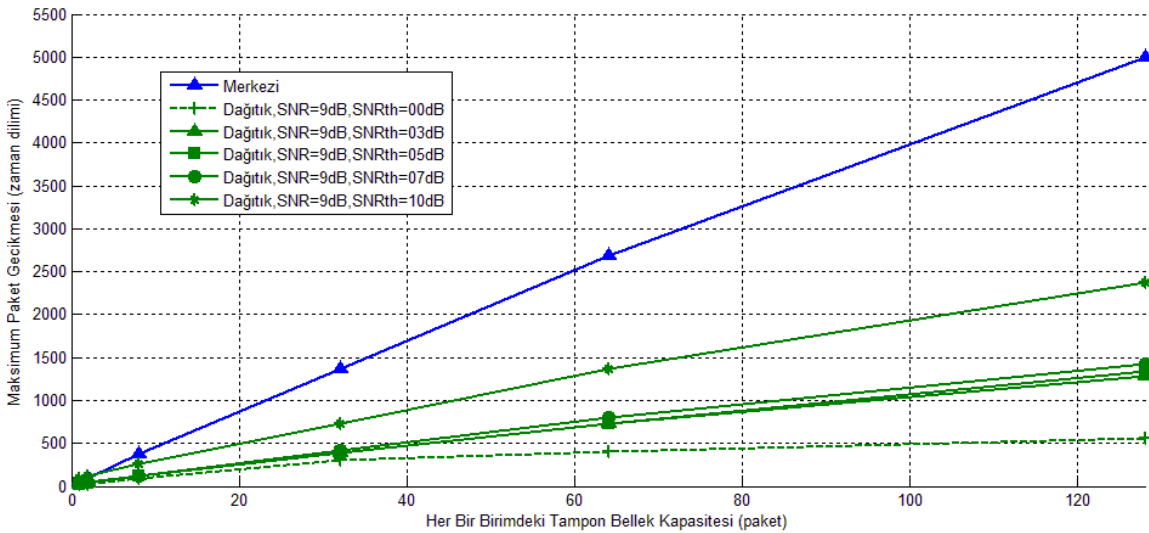
3.2.3 Tampon Bellek Kapasitesinin Etkisi

Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da birimlerdeki tampon bellek kapasitelerine bağlı olarak maksimum ve ortalama paket gecikmesi başarımlarına yer verilmiştir. Aynı zamanda Dağıtık Yöntem için sekmelerdeki ortalama SNR değeri ve eşik SNR değeri parametreleriyle oynanarak başarıma olan etkileri gözlenmiştir. Maksimum paket gecikme süresinin Merkezi Yöntem için tampon bellek kapasitesi ile doğrusal olarak arttığı Şekil 3.13'ten görülmektedir. Bu sonuç, (3.15) ile uyum içindedir. Benzer şekilde ortalama paket gecikmesinin de tampon bellek kapasitesindeki artışla doğrusal olarak arttığı açıkça görülmektedir. Dağıtık Yöntem için de maksimum ve ortalama paket gecikmesi başarımları, tampon bellek kapasitesindeki artıştan aynı şekilde olumsuz etkilenmektedir. Sekmelerdeki ortalama SNR değeri arttıkça (Bkz. Şekil 3.13 ve Şekil 3.15) veya kullanılan eşik SNR değeri düştükçe (Bkz. Şekil 3.14 ve Şekil 3.16) başarımlar göreceli olarak iyileşmektedir. Bu iyileşmenin gerçekleşmesine rağmen, SNR değeri sonsuz olsa dahi bellek kapasiteleri yüksek olduğunda, bu belleklerdeki yığılmalardan kaynaklı gecikmenin önüne geçilemez. Bununla birlikte, Şekil 3.13, Şekil 3.15 ve Şekil

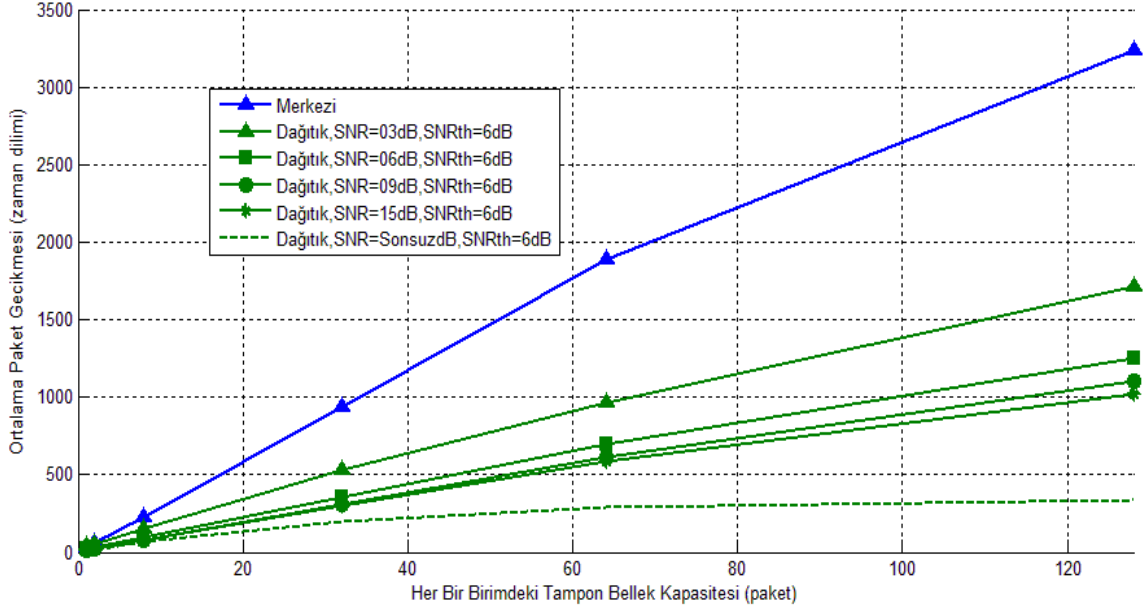
3.17’de sekmelerdeki ortalama SNR değerinin sonsuz olduğu durumlara bir altlimite ulaşmak için yer verilmiş olsa da, bu durumun birimlerin sadece komşularında girişime sebep olabildikleri varsayımı ile çeliştiği ve bu altlimitlerin gerçekte erişilebilir olmadığı açıktır. Karşılaştırmak gerekirse, Dağıtık Yöntem’in başarımının Merkezi Yöntem’den daha iyi olduğu görülmektedir. Birimlerin tampon bellek kapasiteleri yüksek değerler aldığında başarım farkı daha açıktır.



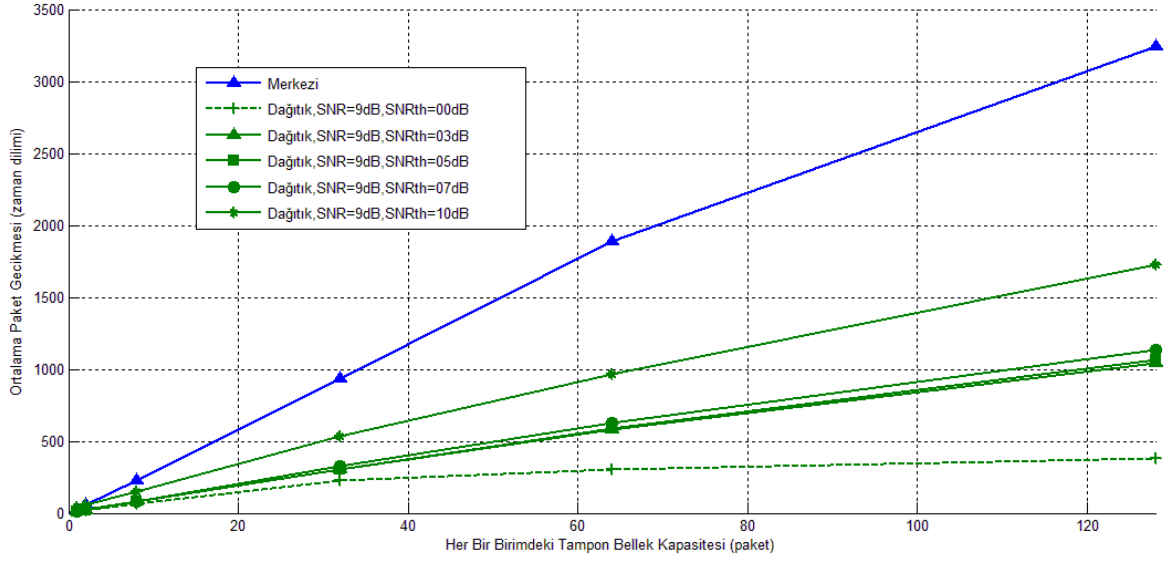
Şekil 3.13 Farklı Tampon Bellek Kapasitelerine ve Farklı Ortalama SNR Değerlerine Bağlı Olarak 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Maksimum Paket Gecikmesi



Şekil 3.14 Farklı Tampon Bellek Kapasitelerine ve Farklı Eşik SNR Değerlerine Bağlı Olarak 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Maksimum Paket Gecikmesi



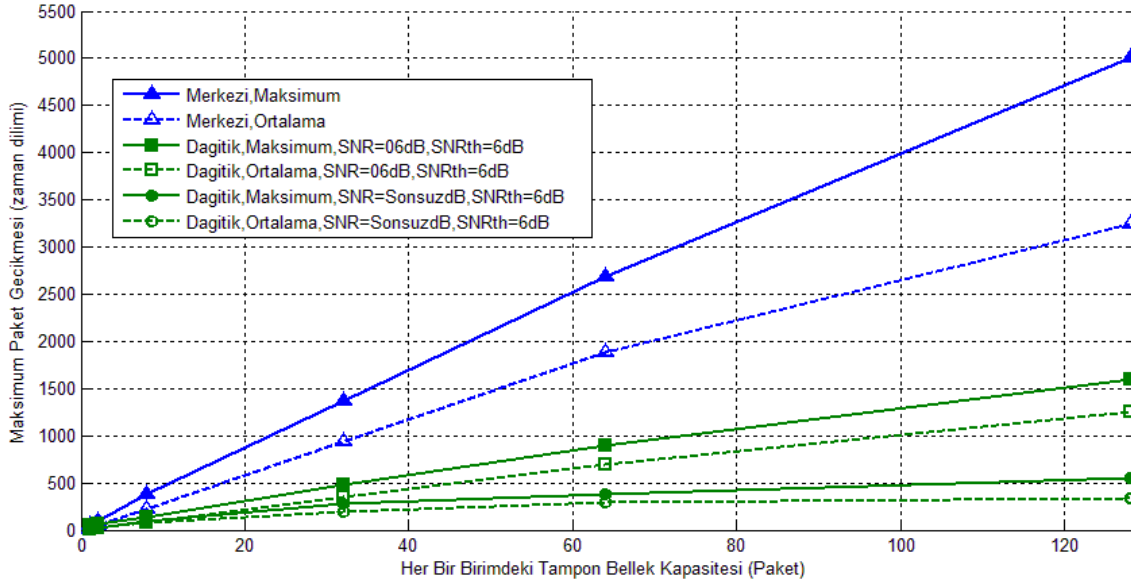
Şekil 3.15 Farklı Tampon Bellek Kapasitelerine ve Farklı Ortalama SNR Değerlerine Bağlı Olarak 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Ortalama Paket Gecikmesi



Şekil 3.16 Farklı Tampon Bellek Kapasitelerine ve Farklı Eşik SNR Değerlerine Bağlı Olarak 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Ortalama Paket Gecikmesi

Şekil 3.17'de birimlerdeki tampon bellek kapasitelerine bağlı olarak maksimum ve ortalama paket gecikmesi başarımlarına birlikte yer verilmiştir. Dağıtık Yöntem için ortalama ve maksimum gecikmeler arasındaki farkın Merkezî Yöntem'e göre daha az olduğu gözlenmektedir. Diğer bir deyişle, paket gecikme süresinin değışintisi

Merkezi Yöntem'e göre daha azdır. Bu sonuç Dağıtık Yöntemi daha tercih edilebilir kılmaktadır.



Şekil 3.17 Farklı Tampon Bellek Kapasitelerine Bağlı Olarak 8-Sekmeli Bir Sistemdeki Maksimum ve Ortalama Paket Gecikmesi

3.3 Tampon Bellek Kapasitesi Doluluk Analizi

Bu bölümde, çok-sekmeli kablosuz ağlardaki birimlerin tampon bellek kapasitelerinin ne kadarını kullandığı çeşitli durumlar için analiz edilmiştir. Analiz için MATLAB ortamında benzetimler yapılmış, benzetimlerin sonuçları burada ele alınmıştır.

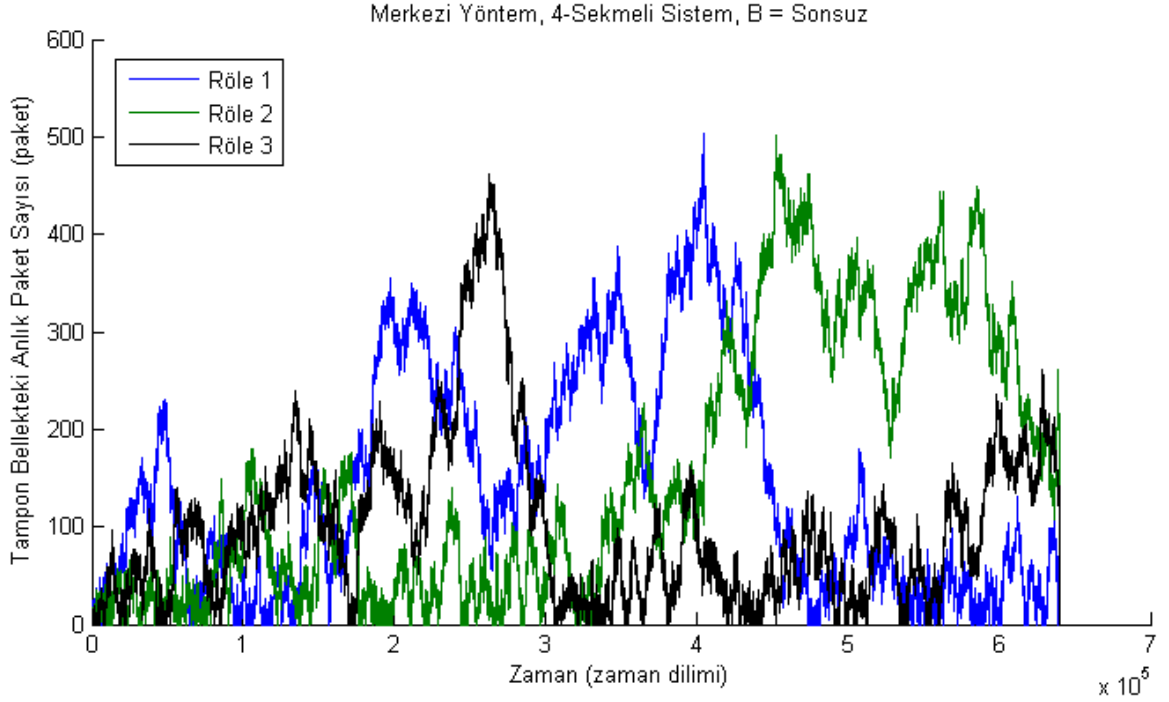
3.3.1 Geleneksel Çizelgeleme

Geleneksel çizelgeleme yönteminde, her birim kendisinden önceki birimin gönderdiği paketi alır, çözümler ve hemen ertesinde kendisinden sonra gelen birime bu paketi yollar. Tampon bellekte paketler bekletilmediği için ek tampon bellek kullanımına gerek yoktur. Her bir birim sadece sistemde kullanılan kiplenim tipinin gerektirdiği kadar tampon bellek kullanır. Örneğin, bir zaman diliminde BPSK kiplenim tipi kullanılarak 1 paket iletiliyorsa, 1 paketlik bir tampon bellek yeterli olacaktır. Benzer şekilde, QPSK ve 16QAM kiplenim tiplerinin kullanıldığı durumlarda sırasıyla 2 ve 4 paketlik bir tampon bellek yeterli olmaktadır.

3.3.2 Merkezi Ve Dağıtık Çizelgeleme

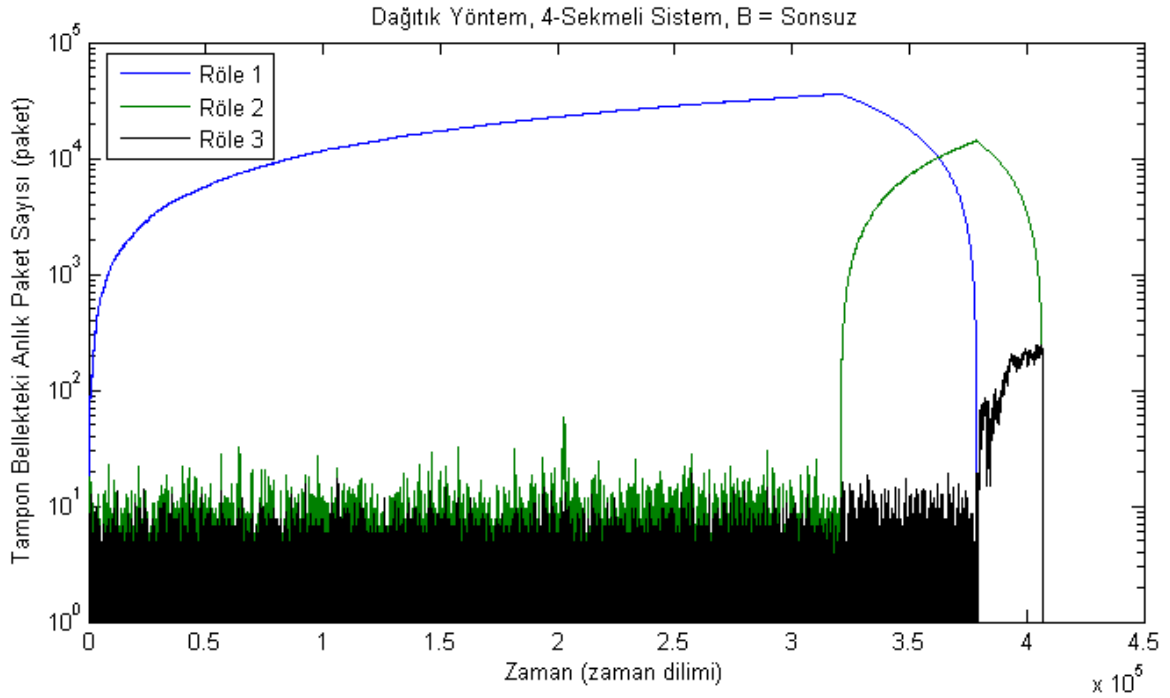
Merkezi Yöntem ve Dağıtık Yöntem için 4-sekmeli bir sistemde, farklı tampon bellek kapasiteleri tanımlanarak anlık ve ortalama tampon bellek doluluk miktarları ölçülmüştür. Tampon bellek kapasitelerinin sonsuz (∞) tanımlandığı durumlarda yöntemlerin kullandığı maksimum tampon bellek kapasitesileri belirlenmiştir.

Röle 1 kaynağa yakın birim, Röle 2 sistemin ortasındaki birim ve Röle 3 hedefe yakın birim olmak üzere, Merkezi Yöntem için tampon belleklerdeki paket miktarlarının zamanla değişimine Şekil 3.18'de yer verilmiştir. Görüldüğü üzere tüm rölelerdeki değişim benzerlik göstermektedir ve anlık kapasitenin maksimum değeri her üç röle için de 500 paket civarındadır. Buradan 500 paketin altında kapasitesi olan tampon bellek kullanımının yeterli olacağı fikri edinilebilir. Bu yorumu destekler şekilde, daha önce analiz edilen BER başarımlarında bellek kapasitesi artışıyla başarımın arttığı ancak sonsuz kapasiteli tampon bellekler kullanmakla 128 paket kapasiteli tampon bellekler kullanmak arasında önemli bir başarım farkı olmadığı görülmüştür. Aksine, bellek kapasitesindeki bu artış paket gecikmelerini tolere edilmesi zor seviyelere getirmiştir.



Şekil 3.18 Merkezi Yöntemin Kullanıldığı 4-Sekmeli Bir Sistemde Sonsuz Kapasitede Tampon Bellek Kullanıldığında Röle Birimlerdeki Paket Sayısının Zamanla Değişimi

Dağıtık Yöntem için tampon belleklerdeki paket miktarlarının zamanla değişimine Şekil 3.19'da yer verilmiştir. Merkezi Yöntem'den farklı olarak rölelerdeki paket miktarlarının birbirinden oldukça farklı olabildiği görülmüştür. Bu yüzden Şekil 3.19'da y eksenini logaritmik ölçek ile verilmiştir. Röle 1'deki bellek kapasitesinin kaynakta paketler bitinceye kadar doğrusal olarak arttığı ve 20000 paketin üzerine çıktığı görülmektedir. Kaynak birimde gönderilecek paket kalmadığında, yoğun olarak, Röle 1'deki paketler Röle 2'ye aktarılmaktadır. O ana kadar ortalama yaklaşık 20 paket saklayan Röle 2'nin anlık tampon bellek kapasitesi böylece 10000 pakete kadar çıkmakta ve ortalama kapasitesi de 1502 pakete yükselmektedir (Bkz. Tablo 3.2). Röle 3 ise ortalama olarak oldukça az kapasite doluluğu ile çalışmakta iken iletimin tamamlanmasına yakın Röle 2'den iletimlerin sıklaşması ile anlık olarak 200 paketin üzerine, ortalama olarak da 10.8 pakete erişmektedir.

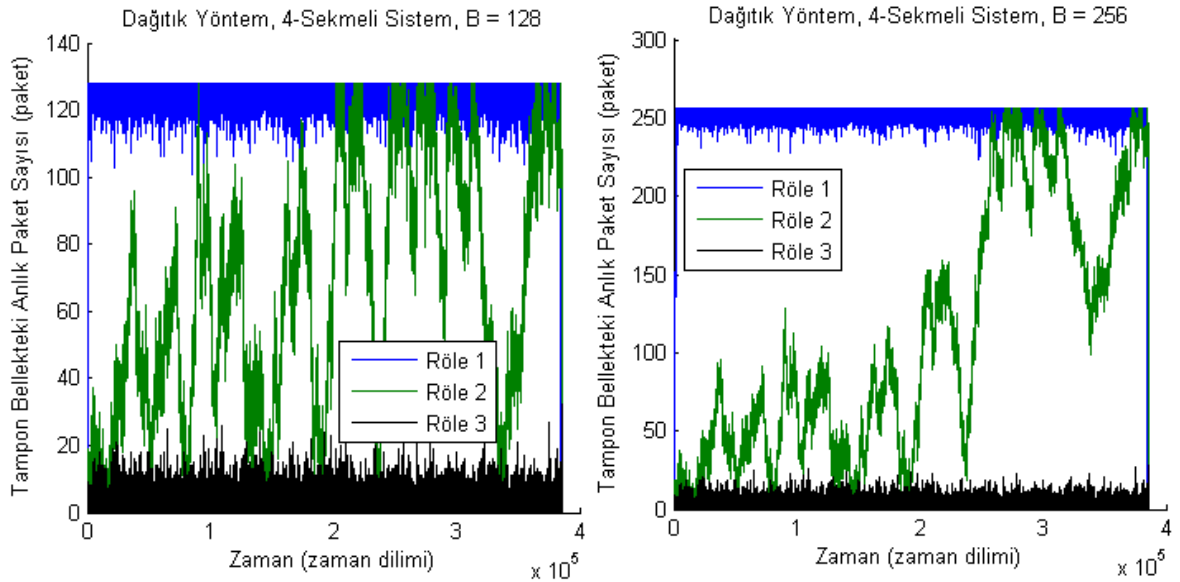


Şekil 3.19 Dağıtık Yöntemin Kullanıldığı 4-Sekmeli Bir Sistemde Sonsuz Kapasitede Tampon Bellek Kullanıldığında Röle Birimlerindeki Paket Sayısının Zamanla Değişimi (Ortalama SNR = 21 dB, eşik SNR = 3 dB)

Tablo 3.2’de verilen rölelerin tampon belleklerinde sakladıkları ortalama paket sayılarından TB_{\max} düşük iken her iki yöntemin de benzer sonuçlar ortaya çıkardığı ve dağılımların röleler arasında dengeli (yakın) olduğu görülmektedir. Bu kısıtlı kapasitenin yarattığı bir zorunluluktur. TB_{\max} büyüdükçe Merkezi Yöntem’de röleler nispeten yakın kapasitelere sahiptir. Dağıtık Yöntem’de ise kaynağa yakın rölelerde (Röle 1) paket birikmeleri daha fazla olmaktadır ve ayrılan kapasitenin neredeyse tamamı kullanılmaktadır. Hedefe yakın rölelerde (Röle 3) ise kapasite düşük oranlarda kullanılmaktadır (Bkz. Şekil 3.20). Buradan, paket gecikme sürelerini azaltmak adına, Dağıtık Yöntem için sıkışıklığın çok olduğu kaynağa yakın birimlerde daha az kapasiteli tampon bellekler kullanılabileceği sonucu çıkarılabilir. Benzer şekilde bir çıkarım paket silmeli bir çizgisel ağdaki kapasiteyi ve paket gecikmesini analiz eden [41] çalışmasında da yapılmıştır.

Tablo 3.2 4-Sekmeli Bir Sistemin Röle Birimlerindeki Ortalama Bellek Dolulukları
(Ortalama SNR = 21 dB, eşik SNR = 3 dB)

TB _{max} (paket)	Merkezi Yöntem (paket)			Dağıtık Yöntem (paket)		
	Röle 1	Röle 2	Röle 3	Röle 1	Röle 2	Röle 3
1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8	4.7	4.0	3.3	6.1	4.0	1.9
32	18.6	15.6	13.0	29.2	16.4	2.75
128	81.0	57.5	45.7	124.6	66.7	2.96
256	150.7	114.5	83.2	251.6	111.1	2.98
Sonsuz	142.6	154.3	101.4	16912	1502	10.8

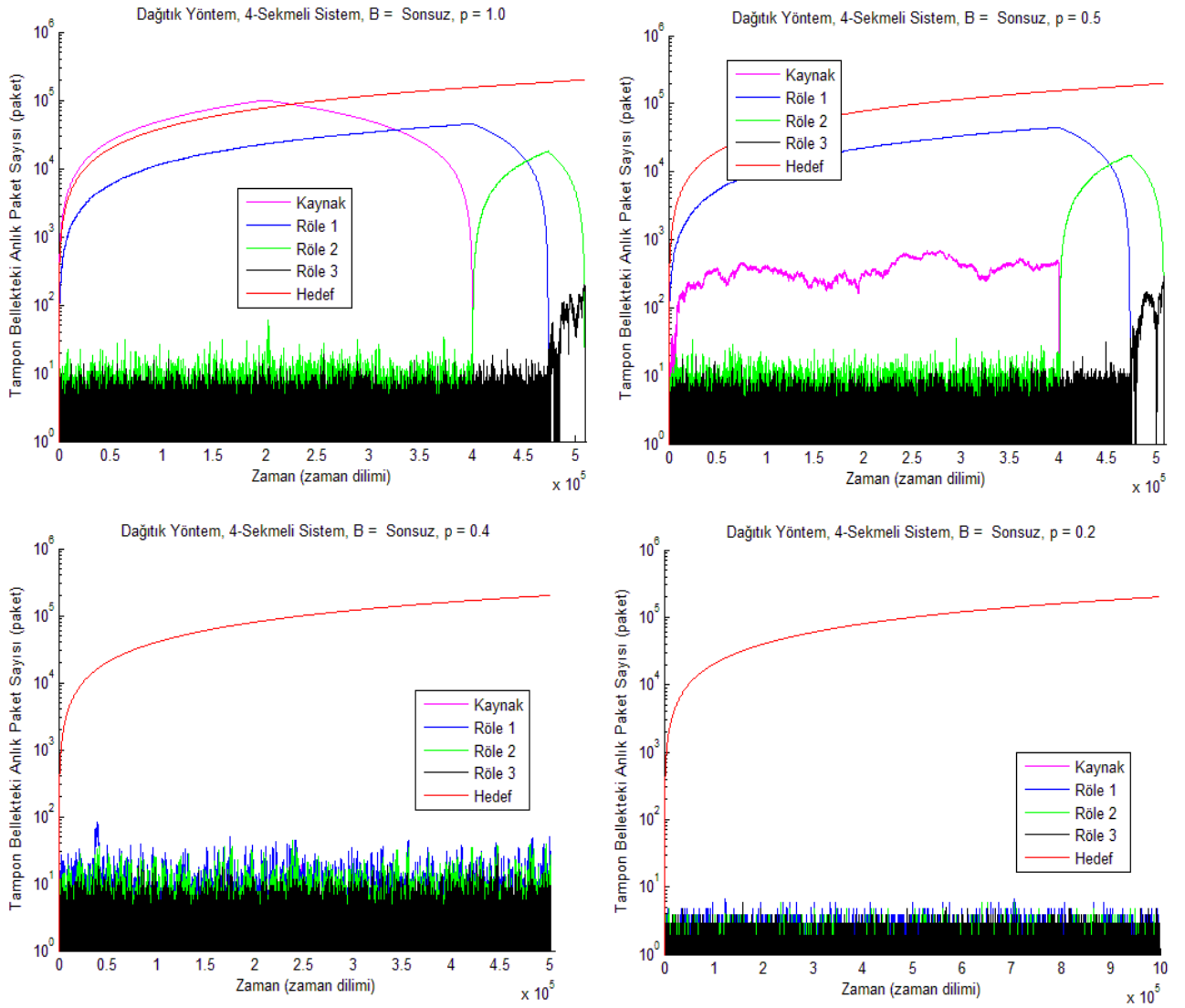


Şekil 3.20 Dağıtık Yöntemin Kullanıldığı 4-Sekmeli Bir Sistemde 128 ve 256 Paketlik Kapasitede Tampon Bellek Kullanıldığında Röle Birimlerdeki Paket Sayısının Zamanla Değişimi (Ortalama SNR = 21 dB, eşik SNR = 3 dB)

Buraya kadar yapılan tampon bellek kapasite kullanımı analizlerinde, kaynak birimde gönderime hazır sonsuz sayıda paket olduğu varsayımı ile yola çıkılmıştır. Bu varsayım [21] numaralı merkezi yöntemin tanımladığı çalışma ile tutarlılık açısından kullanılmıştır. Bu durumda, kaynağa yakın rölelerde aşırı paket yığılmaları gözlenmiştir. Ancak, bu varsayım her senaryoda geçerli olmayabilir. Bazı durumlarda kaynakta her zaman paket olmayabilir; kaynağa paketler düşük veya yüksek hızlarla gelebilirler. Bunun yerine, daha kapsamlı bir yaklaşımla, kaynağa bir Bernoulli rassal sürecine göre veri paketleri geldiği varsayılırsa, sonuçlar daha anlamlı olacak ve sistemin kararlı durumda olmasından bahsedilebilecektir. Şekil 3.21’de kaynağa paket gelme olasılığının (p) 1.0, 0.5, 0.4 ve 0.2’ye eşit olduğu durumlar için tüm birimlerin tampon belleklerindeki anlık paket sayısı grafiklerine yer verilmiştir. Benzetim için, 4-sekmeli bir sistemde dağıtık yöntem kullanılmış ve birimlere sonsuz kapasiteli bellekler atanmıştır. Her bir sekmede ortalama SNR değeri 21 dB ve eşik SNR değeri de 3 dB olarak kullanılmıştır. Analiz için 200000 paket kaynak birimden hedefe taşınmıştır. Her zaman diliminde kaynağa paket geldiği ($p=1.0$) durumda sonuç kaynakta sonsuz paketin olduğu durumla, diğer bir deyişle Şekil 3.19 ile aynıdır. İki durumda da göndermek için her zaman bir paket kaynakta yer almaktadır. ($p=0.5$) durumunda ise kaynakta birikim daha az olmasına rağmen, hala kaynaktan Röle 1’e iletimi baskın kılacak yeterli bir basınç olduğu görülmektedir. Bu yüzden, rölelerdeki kapasite kullanımları $p=1.0$ durumuna göre değişiklik göstermez. Kaynağa veri paketlerinin daha düşük hızlarda geldiği durumlarda ise ($p=0.4$ ve $p=0.2$), kaynak baskın bir durum yaratmadığı için hem kaynakta hem de rölelerde kapasite kullanımları düşük, birbirlerine yakın ve kararlı haldedirler. Örneğin, $p=0.4$ için, hiçbir birimdeki bellek anlık olarak 80 paketin üzerine çıkmamaktadır ve ortalama kullanılan kapasite 4 paket civarındadır. ($p=0.2$) durumunda ise anlık kapasite hiç bir birimde 7 paketi geçmemektedir, ortalamaları ise 0.2 paket civarındadır. Görüldüğü üzere, kaynağa paket varış hızı azaldıkça, iletim yapan tüm birimlerin tampon belleklerindeki anlık paket sayısı azalmakta ve daha kararlı bir duruma gelmektedir.

Özellikle kaynak birime paketlerin gelme olasılığının yüksek olduğu ($p>0.5$) durumlarda, belleklerde oluşan yığılmaları önleyerek kapasite kullanımlarını kararlı (sınırlı) hale getirmek için ağırlık akış hızını eniyileyen çok-sekmeli ağlar için

geliştirilmiş *back pressure* algoritmasının bir çeşidi kullanılabilir [43]. Bu yöntem temelinde, vericide çok paketin alıcıda az paketin olduğu ve kanal durumu iyi olan sekmelerde iletim yapmayı içerir. Alternatif olarak verici ve alıcı belleklerdeki paket sayısı farkı belirli bir eşik değeri geçtiğinde o sekme öncelik tanınabilmektedir [44]. Bu yöntem, bu çalışma kapsamında ele alınmamıştır ancak ilerideki çalışmalarda dağıtık yöntemin güncellenmesinde kullanılabilir.



Şekil 3.21 Dağıtık Yöntemde Kaynağa Paketler Bernoulli Rassal Sürecine Göre Geldiğinde Birimlerdeki Paket Sayısının Zamanla Değişimi

4. UYARLAMALI KIPLENİMİN BAŞARIMA ETKİSİ

Daha önceki bölümlerde Merkezi Yöntem ve Dağıtık Yöntem için birimlerin kanal durum bilgisinden yararlandığı belirtilmiştir. Çizelgeleme kararı için kullanılan bu bilgiler aslında daha faydalı olacak biçimde kullanılabilir. Tezin bu bölümünde, çizelgeleme yöntemlerinde her zaman BPSK kiplenim tipinin kullanılması yerine sekmelerdeki kanalların anlık durumuna göre uyarlamalı olarak farklı kiplenim tiplerinin (BPSK, QPSK ve 16QAM) kullanılmasının başarımlara olan etkisi incelenmiştir ve Matlab ortamında oluşturulan benzetimlerin sonuçlarına yer verilmiştir.

Verilen sistem üzerinde, uyarlamalı kiplenim temelde iki şekilde yapılandırılabilir. Esasında, bu iki temel yöntemin melez sürümleri de uyarlamalı kiplenim için kullanılabilir ancak bu durum bu çalışmanın kapsamında değildir.

Yapılandırmaların ilkinde sistemin akış hızı herhangi bir kısıt gözetmeksizin enbüyütülmeye çalışılır. Bu durumda BER başarımında kayıp söz konusu olacaktır. Sistemdeki herhangi bir sekmede (l) mevcut zaman diliminde (t) kanalın anlık SNR değerine ($\gamma_{l,t}$) göre iletilebilecek maksimum paket sayısı ($U_{l,t}$) Şekil 3.1 kullanılarak bulunabilir. Sekmenin solundaki ve sağındaki birimlerin anlık tampon bellek kapasitesilerini sırasıyla TB_{l-1} ve TB_l , birimlerin maksimum tampon bellek kapasitelerini TB_{\max} olarak ifade edersek ve $\min(a, \dots, z)$ argümanlarının en küçüğünü dönen bir işlev olarak tanımlanırsa mevcut zaman diliminde ilgili sekmede iletilebilecek maksimum paket sayısı,

$$P_{l,t} = \min(TB_{l-1}, TB_{\max} - TB_{l,t}, U_{l,t}) \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilir. Merkezi Yöntem için akış hızı enbüyütülmek istenirse, $\max(a, \dots, z)$ argümanlarının en büyüğünü dönen bir işlev olarak tanımlandığında seçilmesi gereken sekmeyi

$$l^* = \arg_l \max(P_{l,t}), \quad l = 1, \dots, L \quad (4.2)$$

ifadesi verecektir. Ancak bu durumda seçilen sekme, o zaman diliminde en yüksek anlık SNR değerine sahip sekme olmayabileceği için sistemin BER başarımında kayıp olacaktır. Aynı durum Dağıtık Yöntem için de (grup seviyesinde) geçerlidir.

Bu çalışmada tercih edilerek kullanılan ikinci yapılandırma yönteminde ise, akış hızı her bir sekmedeki (dolayısıyla sistemin) BER başarımı belirli bir seviyenin altında kalmamak koşuluyla enbüyütülür. Bunun için alıcı ve verici birimlerdeki anlık tampon bellek durumlarından ziyade anlık SNR değerleri birincil öneme sahiptir. Dolayısıyla sadece 1 paket veri gönderilebilecek olsa dahi en yüksek anlık SNR değerine sahip sekmeler iletim için seçilirler. BER başarımında ölçüt olarak anlık veya ortalama BER hedefi kullanılabilir [31]. Bu çalışmada, daha kısıtlayıcı olan anlık BER hedefi kullanılmıştır, böylece hedeflenenden daha iyi BER başarımları elde edilmiştir.

Uyarlamalı kiplenim kullanımının sistemdeki iletim yapacak birimlerin koordinasyonu sürecinde ek bir külfeti vardır. BPSK kiplenim tipi kullanıldığında herhangi bir zaman diliminde 1 paket veri gönderileceği sistem genelinde bilindiği için hem tampon bellek durumunu hem de iletim yapma kararını boş/dolu (0/1) şeklinde ifade etmek yeterliydi. Bu durumda ise tampon bellekte kaç paket tutabilecek kadar kapasite olduğunu ayrıca iletim kararı bildirimlerinde (T/R) de kaç paket veri gönderileceğini (hangi konstelasyon tipinin kullanılacağını) komşu birimlere iletmek gerekmektedir. Diğer bir deyişle, sistemdeki kiplenim tipi sayısı m ise Kanal Kalitesi Kestirimi Aşaması ve Gönderim Yapacak Birimler Hakkında Karar Verilmesi Aşaması'nda $\lceil \cdot \rceil$ argümanını kendisinden daha büyük olan en yakın tamsayıya dönüştüren bir işlev olmak üzere $\lceil \log_2 m \rceil$ kat fazla bilgi aktarımı gerekmektedir.

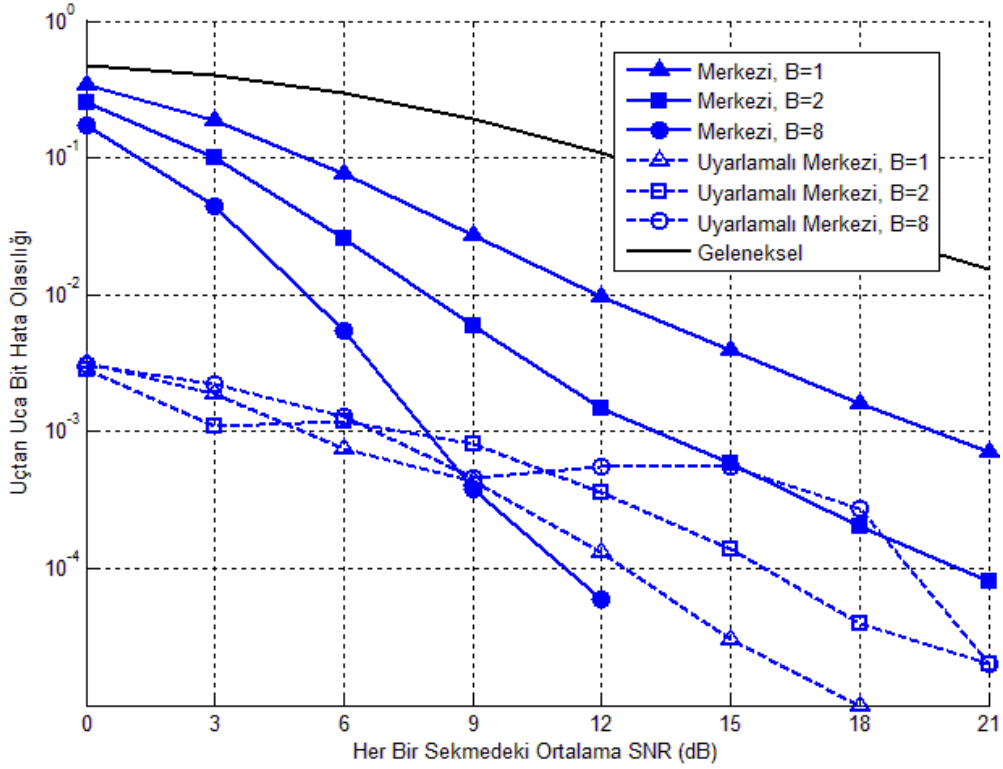
Anlık SNR değerine göre o zaman diliminde hangi kiplenim tipi kullanılarak iletim yapılacağına kararına ilişkin, her bir sekmedeki BER başarım değeri 10^{-3} olduğunda kullanılacak SNR değerleri Tablo 3.1'de yer almaktadır. Benzetimlerde bu değerler kullanılmış ve anlık SNR değeri 7 dB'den küçükse (önceki bölümde Dağıtık Yöntem'de olduğu gibi) hem Merkezi Yöntem hem de Dağıtık Yöntem için iletim yapmama seçeneği tercih edilmiştir. Benzetimlerde 8-sekmeli bir sistem kullanılmıştır.

4.1 Sistemin Uçtan Uca Bit Hata Olasılığı Analizi

Şekil 4.1'de Merkezi Yöntem'in BPSK ve uyarlamalı kiplenim tiplerinin kullanıldığı durumlardaki bit hata olasılığı başarımlarına yer verilmiştir. Uyarlamalı kiplenim

için sekme başına 10^{-3} BER hedefi konulduğu için, sistemin uçtan uça bit hata olasılığının da $8 \cdot 10^{-3}$ 'den düşük olması beklenmektedir. Şekilden görüldüğü üzere istenen başarımlar sağlanmaktadır. Tampon bellek kapasitesi olarak 1 veya 2 paket kullanıldığında uyarlamalı kiplenimin BPSK'dan daha üstün başarımlar sağladığı görülmektedir. Tampon bellek kapasitesi 8 paket ve üzerinde kullanıldığında ise yüksek SNR değerlerinde BPSK'nın başarımlarını daha iyi olabilmektedir. Buna karşın Şekil 4.2'den görüldüğü üzere uyarlamalı kiplenim ile akış hızında bir kazanç sağlanmaktadır. Bu durum tamamen hedeflenen BER değerine bağlıdır. Sistem için daha yüksek bir BER değeri (düşük başarımlar) hedeflenirse uyarlamalı kiplenimin başarımlarını yüksek kapasiteli tampon belleklerin kullanıldığı sistemlerde de BPSK'yi geçecektir. Ancak, bunun karşılığında akış hızından kayıp yaşanacaktır.

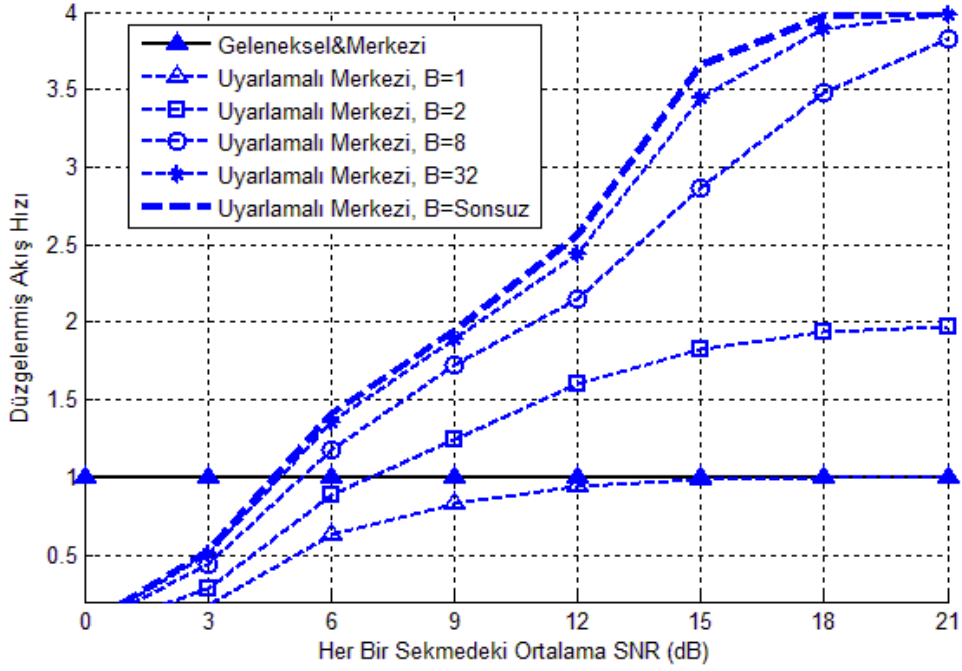
Uyarlamalı kiplenim kullanıldığında, düşük SNR bölgelerinde farklı bellek kapasitelerinin BER başarımları, zamanın çoğunda paket gönderilmediği için, birbirine çok yakın iken yüksek SNR bölgelerine gelindiğinde düşük kapasiteli (örneğin 1 paket) bellek kullanımlarının BER başarımlarını daha iyidir. Bunun nedeni kanal daha fazla paket gönderilebilecek kadar iyi iken tampon bellek kısıtından dolayı az paket iletimidir, diğer bir deyişle uyarlamamanın kısıtlı yapılabilmesidir. Böylece hata yapma olasılığı azalmaktadır. Önceki bölümlerden hatırlanacağı ve Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi, BPSK kullanımında ise bellek kapasitesindeki artışla birlikte, seçim yapılabilecek sekme sayısındaki artışın neticesinde, BER başarımlarını artmaktadır.



Şekil 4.1 Uyarlamalı Merkezi Yöntemin BER Başarımı

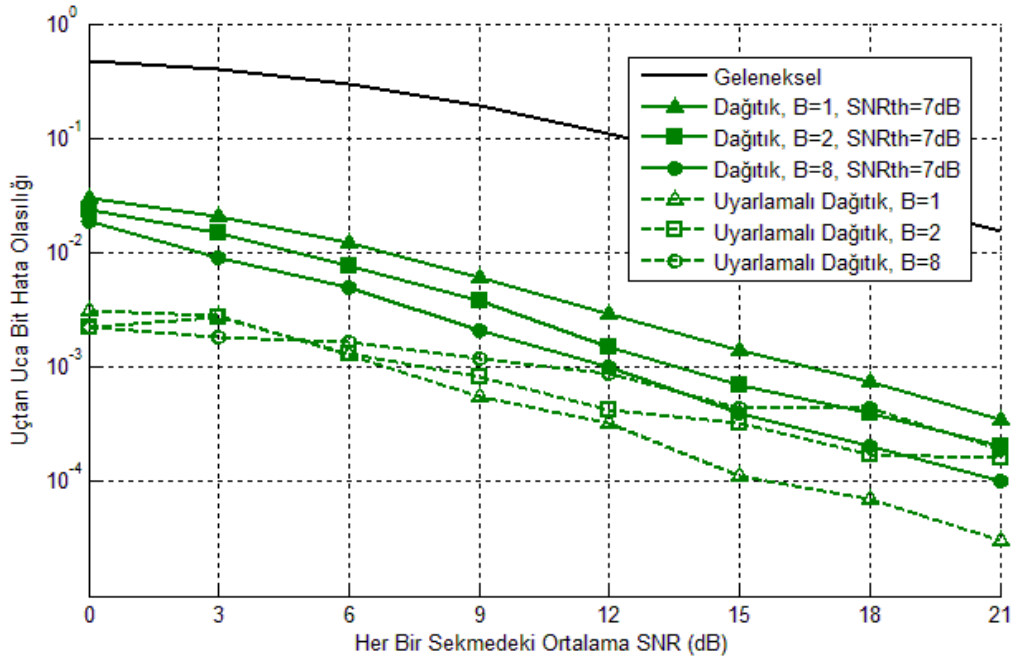
Şekil 4.2’de Uyarlamalı Merkezi Yöntem’in farklı tampon bellek kapasiteleri için düzelenmiş akış hızı değerlerine yer verilmiştir. Tampon bellek kapasitesinin 1 paket olduğu durumda, beklendiği üzere, düşük SNR bölgesinde akış hızı Merkezi Yöntem’den daha kötü olmaktadır ancak BER başarımı daha iyidir. Merkezi Yöntem’in akış hızına ancak 12 dB ve üzeri SNR değerlerinde erişilebilmektedir. Tampon bellek kapasitesi 2 pakete çıkarıldığında akış hızı artmaktadır ancak bir zaman diliminde yalnızca bir birim iletim yapabildiği ve tampon bellek kapasiteleri 2 paketle sınırlı olduğu için, düzelenmiş akış hızı 2 üstsınırını aşamaz. Yüksek tampon bellek kapasitelerinde (32 paket ve üzeri gibi) de benzetimlerde kullanılan izgesel verimliliği en yüksek kiplenim tipi olan 16QAM aynı zaman diliminde 4 paket iletimine imkan sağladığı için, üstsınır 4’ün aşmadığı görülebilmektedir. Şekil 4.2’de görüldüğü üzere sonsuz kapasiteli tampon bellek kullanımıyla 32 paket kapasiteli tampon bellek kullanımı arasında kayda değer bir fark yoktur. Paket gecikme sürelerinin bellek kapasitelerindeki artışla doğrusal olarak arttığı da göz önünde bulundurulursa, birimlerde çok yüksek kapasiteli tampon bellek kullanımının hem maliyet hem performans açısından tercih edilebilir olmadığı

söylenbilir. Ayrıca çok yüksek kapasiteli tampon bellek kullanılması durumunda bellek erişim süreleri daha uzun olacaktır [41].



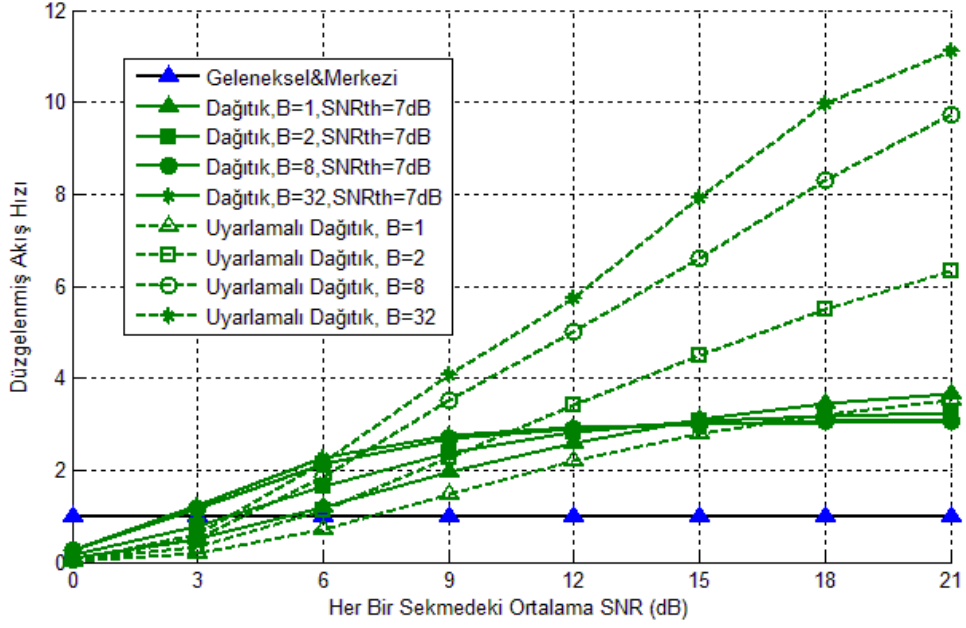
Şekil 4.2 Uyarlamalı Merkezi Yöntemin Düzgelenmiş Akış Hızı Başarımı

Şekil 4.3'te Uyarlamalı Dağıtık Yöntem'in Dağıtık Yöntem'le karşılaştırmalı olarak uçtan uca BER başarımına yer verilmiştir. Dağıtık Yöntem, anlık SNR değeri eşik SNR'ın (7 dB) üzerinde ise iletim yapıldığı için Uyarlamalı Dağıtık Yöntem'e oldukça benzer sadece uyarlama miktarı düşüktür. Sonuç olarak, BER başarımları benzerlik göstermekle birlikte Uyarlamalı Dağıtık Yöntem'in daha üstün başarımlar sergilediği görülmektedir. Uyarlamalı Merkezi Yöntem ile aynı nedenden dolayı yüksek SNR değerlerinde tampon bellek kapasitesindeki artışla BER başarımı bir miktar düşmektedir.



Şekil 4.3 Uyarlamalı Dağıtık Yöntemin BER Başarımı

Şekil 4.4'te Uyarlama Dağıtık Yöntem'in düzgelenmiş akış hızı başarımı görülmektedir. Özellikle yüksek SNR değerlerinde 16QAM kiplenim tipinin kullanımının sıklaşması ile oldukça yüksek düzgelenmiş akış hızı değerlerine ulaşılmaktadır. Örneğin her bir sekmedeki ortalama SNR değeri 21 dB iken, 8 paket kapasiteli tampon bellekler kullanıldığında düzgelenmiş akış hızı 11 olmaktadır. Dağıtık Yöntem için düzgelenmiş akış hızı üst sınırı aynı anda iletim yapabilecek maksimum birim sayısı (4) ile verilebilecekken, bu değer Uyarlamalı Dağıtık Yöntem'de en yüksek izgesel verimliliğe sahip kiplenim tipinin (16QAM) izgesel verimliliği (4) ile çarpılarak bulunabilir. Benzetimi yapılan 8-sekmeli sistem için bu değer teorik olarak 16'dır.



Şekil 4.4 Uyarlamalı Dağıtık Yöntemin Düzgelenmiş Akış Hızı Başarımı

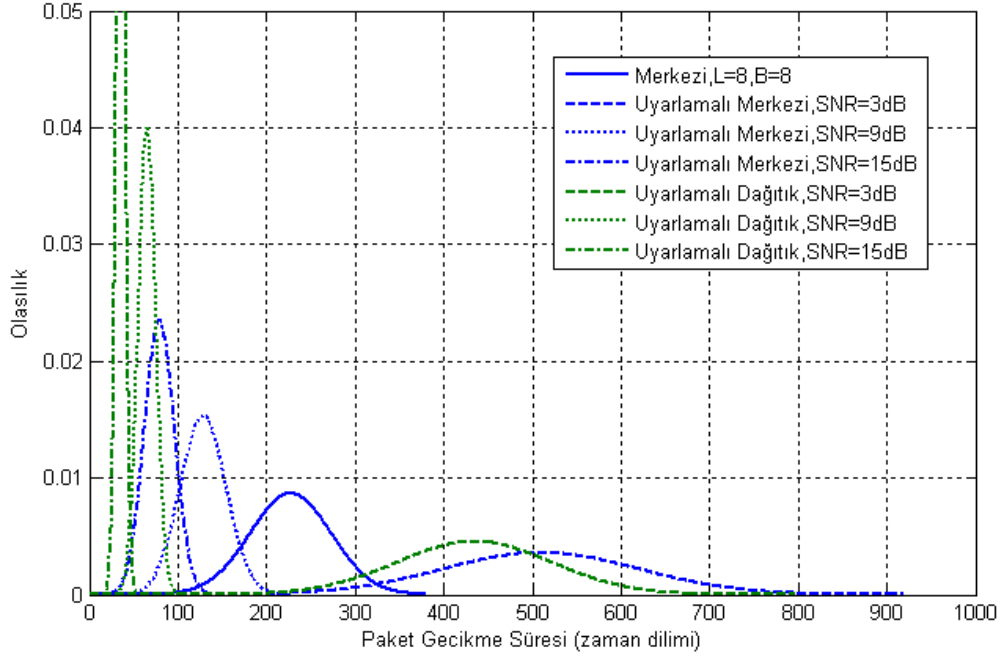
4.2 Sistemin Ortalama ve Maksimum Paket Gecikme Süreleri Analizi

Uyarlamalı Merkezi ve Uyarlamalı Dağıtık yöntemlerin blok gecikme başarımları incelendiğinde, (3.14) ile verilen blok gecikmesi tanımından yola çıkarak yöntemlerin yüksek düzgelenmiş akış hızları neticesinde blok gecikmelerinin oldukça düşük değerlere gerileyebildiği görülmektedir. Blok gecikme sürelerini hesaplamak için yöntemlerin düzgelenmiş akış hızı başarımları grafikleri kullanılabilir.

Minimum paket gecikmesi açısından değerlendirildiğinde uyarlamalı kiplenim kullanımı bir fayda sağlamamaktadır, her yöntem için minimum paket gecikmesi L zaman dilimidir.

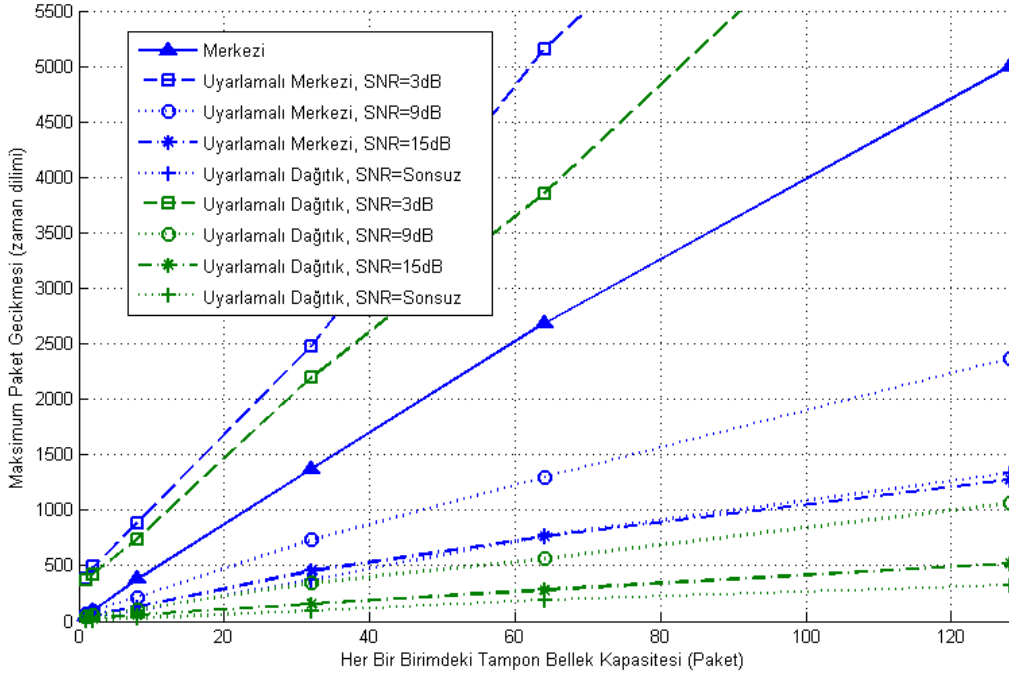
Uyarlamalı Merkezi ve Uyarlamalı Dağıtık Yöntem kullanıldığında ortalama ve maksimum paket gecikme süreleri, sezgisel olarak beklendiği üzere, blok gecikme sürelerindeki benzer bir azalış sergilemektedir. Şekil 4.5'te 8 paketlik kapasiteye sahip tampon belleklerin kullanıldığı 8-sekmeli bir sistem için uyarlamalı kiplenim kullanıldığı durumda çizelgeleme yöntemlerinin paket gecikme sürelerinin olasılık yoğunluk işlevine yer verilmiştir. Düzgelenmiş akış hızı başarımlarına paralel olarak Uyarlamalı Merkezi Yöntem, yüksek ortalama SNR değerlerinde, bir zaman diliminde daha fazla paket iletebilmesi sonucu Merkezi Yöntem'e göre daha düşük paket gecikmesi sunmaktadır. Uyarlamalı Dağıtık Yöntem ise aynı anda birden

fazla birimin iletim yapabilmesi avantajından dolayı Uyarılama Merkezi Yöntem’den de iyi bir başarımla ortaya koymaktadır. Kanal durumları iyileştikçe ortalama paket gecikme süreleri azalırken aynı zamanda paket gecikme sürelerinin değışintisi de azalmaktadır. Böylece tüm veri paketleri benzer sürelerde hedef birime ulaşırlar.

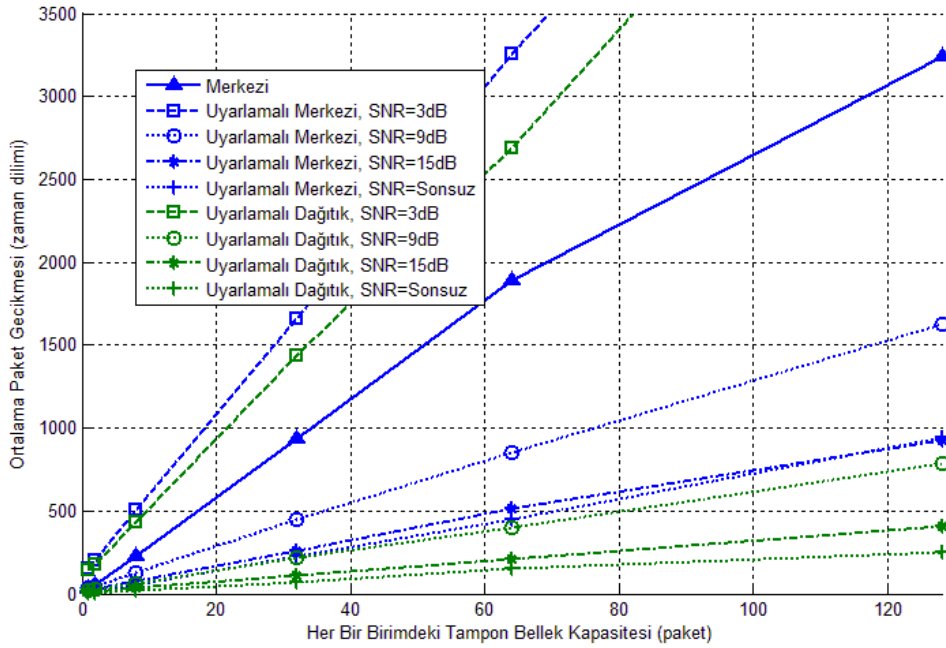


Şekil 4.5 Uyarlamalı Merkezi ve Uyarlamalı Dağıtık Yöntemlerin Paket Gecikme Sürelerinin Olasılık Yoğunluk İşlevi (L=8, B=8)

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de sırasıyla uyarlamalı kiplenim kullanıldığı durumda çizelgeleme yöntemlerinin tampon bellek kapasitesine ve sekmelerdeki ortalama SNR değerlerine bağlı olarak maksimum ve ortalama paket gecikme sürelerine yer verilmiştir. Sekmelerdeki ortalama SNR değeri arttıkça maksimum ve ortalama paket gecikme sürelerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, SNR değeri sonsuz olsa dahi eğer bellek kapasiteleri yüksekse bu belleklerdeki paket yığılmaların önüne tamamen geçilememektedir. Örneğin, Uyarlamalı Dağıtık Yöntem kullanılıp bellek kapasiteleri 128 paket olarak tanımlanırsa, ortalama paket gecikme süresinin altsınırının 250 zaman dilimi olduğu gözlenmektedir. Uyarlamalı Dağıtık Yöntem’in başarımla, doğası gereği aynı anda ayrışık birimler iletim yapabildiği için, Uyarlamalı Merkezi Yöntem’e göre daha iyi olmaktadır. Her iki yöntem için de maksimum ve ortalama paket gecikme sürelerinin tampon bellek kapasitelerindeki artışla doğrusal olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 4.6 Uyarlamalı Merkezi ve Uyarlamalı Dağıtık Yöntemlerin Maksimum Paket Gecikmeleri (L=8)



Şekil 4.7 Uyarlamalı Merkezi ve Uyarlamalı Dağıtık Yöntemlerin Ortalama Paket Gecikmeleri (L=8)

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, her bir sekmesi Rayleigh sönümlenmeye maruz kalan, her biriminde 2-hüzmeli anahtarlamalı-hüzme anteni ve alınan veri paketlerini daha sonra uygun koşullar altında iletmek üzere saklamak için tampon bellek bulunan çok sekmeli kablosuz bir çizgisel röle ağı ele alınmıştır. Sistemdeki tüm birimlerdeki çıkış gücü eşit tutulmuştur ve işbirliği stratejisi olarak Çöz-ve-İlet kullanılmıştır.

Verilen bu sistem için geleneksel, merkezi ve dağıtık çizelgeleme yöntemleri incelenmiştir. Çizelgeleme yöntemlerinin başarımları uçtan uca bit hata olasılığı, akış hızı, blok gecikmesi, ortalama ve maksimum paket gecikmesi, tampon bellek doluluğu gibi ölçütler ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu başarımlara sistemdeki sekme sayısının, birimlerdeki tampon bellek kapasitesinin, dağıtık yöntemin kullandığı eşik SNR değerinin nasıl etki ettiği Matlab ortamında oluşturulan benzetimler ile analiz edilmiştir.

Geleneksel yöntem her bir birimin herhangi bir koşuldaki bağımsız olarak kendisine tanımlanmış zaman diliminde iletim yapmasını öngören görece basit bir yöntemdir. Geleneksel yöntem alternatif olarak sunulan merkezi yöntemde ise tüm birimlerle iletişimi olan bir kontrol birimi sekmelerdeki kanal durumlarına ve birimlerin tampon bellek durumlarına göre iletim yapacak birime dinamik olarak karar verir. Merkezi yöntemin merkezi kontrol birimine ihtiyaç duyması ve sistemdeki her birimin kendi aralarındaki iletişimin dışında bir de merkezi kontrol birimi ile iletişim kurma zorunluluğunu gerçekleminin zorluğu göz önünde bulundurularak, bir çeşit dağıtık çizelgeleme yöntemi tanımlanmıştır.

Merkezi yöntemin geleneksel yöntemde göre ek tampon bellek kullanılmadığı durumda dahi sağladığı seçici çeşitlilikten dolayı BER başarımının üstün olduğu bilinmektedir. Merkezi yöntemde alternatif olarak önerilen dağıtık yöntemin, doğası gereği, özellikle yüksek ortalama SNR değerleri için akış hızı, blok ve paket gecikmesi başarımlarında merkezi yöntemden üstün olduğu anlaşılmıştır. Dahası, uygun eşik SNR seçimi ve özellikle düşük kapasiteli (1 veya 2 paket) tampon bellek kullanımlarında ek olarak BER başarımının da merkezi yöntemden iyi olabildiği görülmüştür. Böylece bir kontrol birimi kullanmadan tüm ölçütlerde aynı başarımları sağlamanın mümkün olduğu görülmüştür. Ancak yüksek kapasiteli

tampon bellek kullanımlarında merkezi yöntemin BER başarımını dağıtık yöntemin yakalaması mümkün olmamaktadır.

Sistemdeki sekme sayısının artışı ile merkezi yöntem için en iyi durumdaki sekmenin seçileceği küme büyüdüğü için BER başarımı artmakta iken, dağıtık yöntem için tersi durum sözkonusudur. Ancak, beklendiği üzere sekme sayısı artışı akış hızına olumlu yansımaktadır. Merkezi yöntemde paket gecikme süresi sekme sayısı ile karesel olarak artarken, dağıtık yöntemin bir diğer üstünlüğü olarak gecikmenin doğrusal olarak arttığı gösterilmiştir. Tampon bellek kapasitesi merkezi yöntemin BER başarımını oldukça etkilemektedir. Ancak kapasite olarak 32 paketin üzerine çıkılmasının çok fazla getirisi olmadığı anlaşılmıştır. Dağıtık yöntemin BER başarımını ise iyileştirmektedir ancak etkisi daha azdır. Bununla birlikte, her iki yöntem için de paket gecikme sürelerininin tampon bellek kapasitelerindeki artışla doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Gerçek zamanlı sistemlerde yüksek paket gecikmesi sürelerinin tolere edilemeyeceği düşünülürse 32 paket ve altı kapasiteli bellek kullanımları tercih edilebilir olarak değerlendirilmiştir. Blok gecikmesi başarımı açısından bakıldığında geleneksel yöntem ve merkezi yöntem eşit başarıma sahipken aynı anda birden fazla birim iletim yapabildiği için dağıtık yöntemin blok gecikmesi daha az olmaktadır. Dağıtık yöntem için eşik SNR değerinin sistemin hedef BER değerine göre seçilerek, BER-akış hızı ödünleşiminin denetim altında tutulabileceği görülmüştür. Birimlerdeki tampon bellek kapasitelerinin kullanımını ölçmek için 4-sekmeli bir sistem ile yapılan benzetimlerde, yüksek (örneğin 256 paket) kapasiteli bellekler kullanıldığında merkezi yöntemde tüm röleler benzer davranışlar sergilerken dağıtık yöntemde kaynağa yakın birimlerde yığılmaların olabildiği, hedefe yakın birimlerde ise kapasitenin çok az bir kısmının kullanılabilirdiği gözlenmiştir. Daha düşük kapasiteli bellek kullanımlarında ise kapasite kullanımlarının her iki yöntemde birbirine yakın ve röleler arasında daha homojen olduğu görülmüştür.

Son olarak, uyarlamalı kiplenim kullanımının yöntemlerin başarımlarına olan etkisi incelenmiştir. Uyarlamalı kiplenimin, sistemin akış hızını oldukça arttırabileceği ve buna ek olarak paket ve blok gecikmelerini azaltabileceği gösterilmiştir. Hedeflenen BER başarımın yakalanabildiği ancak yüksek ortalama SNR

değerlerinde bellek kapasitesi artışının BER başarımında bir miktar kayba yol açtığı görülmüştür.

Bu çalışmada, sistemi basit kılmak adına kanal kodlamasına yer verilmemiştir. İlerde yapılabilecek çalışmalarda 3GPP, HIPERLAN/2, IEEE 802.11a, IEEE 802.16 gibi birçok standartın fiziksel katmanında yer alan ve literatürde hakkında birçok çalışma yapılmış uyarlamalı kiplenim ve kodlama (adaptive modulation and coding) kullanılarak sistem başarımında iyileştirme yapılabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, sisteme maksimum paket gecikmesi, minimum akış hızı gibi kısıtların getirildiği durumlar için çizelgeleme yöntemlerinin güncellenebileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Exploiting distributed spatial diversity in wireless networks," in *Proc. Allerton Conf. Communications, Control, and Computing*, Monticello, IL, Oct. **2000**.
- [2] Sendonaris, A.; Erkip, E.; Aazhang, B.; , "User cooperation diversity. Part I. System description," *Communications, IEEE Transactions on* , vol.51, no.11, pp. 1927- 1938, Nov. **2003**.
- [3] Nosratinia, A.; Hunter, T.E.; Hedayat, A.; , "Cooperative communication in wireless networks," *Communications Magazine, IEEE* , vol.42, no.10, pp. 74- 80, Oct. **2004**.
- [4] Laneman, J.N.; Tse, D.N.C.; Wornell, G.W.; , "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *Information Theory, IEEE Transactions on* , vol.50, no.12, pp. 3062- 3080, Dec. **2004**.
- [5] D. Tse and P. Viswanath. *Fundamentals Of Wireless Communications*. Cambridge University Press, **2005**.
- [6] Gesbert, D.; Shafi, M.; Da-shan Shiu; Smith, P.J.; Naguib, A.; , "From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* , vol.21, no.3, pp. 281- 302, Apr **2003**.
- [7] E. C. V. D. Meulen, "Three-Terminal Communication Channels," *Advances in Applied Probability*, vol. 3, pp. 120–154, **1971**.
- [8] Cover, T.; Gamal, A.E.; , "Capacity theorems for the relay channel," *Information Theory, IEEE Transactions on* , vol.25, no.5, pp. 572- 584, Sep **1979**.
- [9] Host-Madsen, A.; Zhang, J.; , "Capacity bounds and power allocation for wireless relay channels," *Information Theory, IEEE Transactions on* , vol.51, no.6, pp.2020-2040, June **2005**.
- [10] Li, G.Y.; Zhikun Xu; Cong Xiong; Chenyang Yang; Shunqing Zhang; Yan Chen; Shugong Xu; , "Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues," *Wireless Communications, IEEE* , vol.18, no.6, pp.28-35, December **2011**.
- [11] J. Boyer, D. D. Falconer, and H. Yanikomeroglu, "Multihop diversity in wireless relaying channels," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 52, no. 10, pp.1820 – 1830, Oct. **2004**.
- [12] L. Yang, H. Hasna, and M.-S. Alouini, "Average outage duration of multi hop communication systems with regenerative relays," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, vol. 1, pp. 171–175, **2003**.
- [13] N. Esseling, B. Walke, R. Pabst, "Performance evaluation of a fixed relay concept for next generation wireless systems," *Proc. of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol.2, pp.744- 751, Sept. **2004**.

- [14] R. Pabst et al., "Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio," *IEEE Communications Magazine*, Vol.42, Issue.9, pp. 80- 89, Sept. **2004**.
- [15] Lin SJ, Sheen WH, Fu IK, Huang CC. Resource scheduling with directional antennas for multi-hop relay networks in Manhattan-like environment. In: *Proceedings of IEEE mobile WiMAX symposium*; **2007**.
- [16] Peters, S.W.; Heath, R.W.; , "The future of WiMAX: Multihop relaying with IEEE 802.16j," *Communications Magazine, IEEE* , vol.47, no.1, pp.104-111, January **2009**.
- [17] Lo, A.; Niemegeers, I.; , "Multi-hop relay architectures for 3GPP LTE-advanced," *Communications (MICC), 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on* , vol., no., pp.123-127, 15-17 Dec. **2009**.
- [18] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "Performance analysis of two-hop Relayed transmission over Rayleigh-fading channels," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC'02)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 1992–1996, Sept.**2002**.
- [19] V. Emamian, P. Anghel, and M. Kaveh, "Multi-user spatial diversity in a shadow-fading environment," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, vol. 1, pp. 573–576, **2002**.
- [20] Bletsas, A.; Khisti, A.; Reed, D.P.; Lippman, A.; , "A simple Cooperative diversity method based on network path selection," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* , vol.24, no.3, pp. 659- 672, March **2006**.
- [21] Chen Dong; Lie-Liang Yang; Hanzo, L.; , "Multihop Diversity for Fading Mitigation in Multihop Wireless Networks," *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE* , vol., no., pp.1-5, 5-8 Sept. **2011**.
- [22] Lie-Liang Yang; Chen Dong; Hanzo, L.; , "Multihop Diversity - A Precious Source of Fading Mitigation in Multihop Wireless Networks," *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, 2011 IEEE , vol., no., pp.1-5, 5-9 Dec. **2011**.
- [23] Asghari, Vahid; Maaref, Amine; Aissa, Sonia; , "Symbol Error Probability Analysis for Multihop Relaying over Nakagami Fading Channels," *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2010 IEEE , vol., no., pp.1-6, 18-21 April **2010**.
- [24] Jianfei Cao; Lie-Liang Yang; Zhangdui Zhong; , "Performance Analysis of Multihop Wireless Links Over Generalized-K Fading Channels," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* , vol.61, no.4, pp.1590-1598, May **2012**.
- [25] Bing Xia; Yijia Fan; Thompson, J.; Poor, H.; , "Buffering in a Three-Node Relay Network," *Wireless Communications, IEEE Transactions on* , vol.7, no.11, pp.4492-4496, November **2008**.
- [26] Vitiello, F.; Riihonen, T.; Hamalainen, J.; Redana, S.; , "On Buffering at the Relay Node in LTE-Advanced," *Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2011 IEEE , vol., no., pp.1-5, 5-8 Sept. **2011**.

- [27] Ikhlef, A.; Michalopoulos, D.S.; Schober, R.; , "Max-Max Relay Selection for Relays with Buffers," *Wireless Communications, IEEE Transactions on* , vol.11, no.3, pp.1124-1135, March **2012**.
- [28] Rui Wang; Lau, V.K.N.; Huang Huang; , "Opportunistic Buffered Decode-Wait-and-Forward (OBDWF) Protocol for Mobile Wireless Relay Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on* , vol.10, no.4, pp.1224-1231, April **2011**.
- [29] Lianghai Ding; Meixia Tao; Fan Yang; Wenjun Zhang; , "Joint Scheduling and Relay Selection in One- and Two-Way Relay Networks with Buffering," *Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on* , vol., no., pp.1-5, 14-18 June **2009**.
- [30] Krikidis, I.; Charalambous, T.; Thompson, J.S.; , "Buffer-Aided Relay Selection for Cooperative Diversity Systems without Delay Constraints," *Wireless Communications, IEEE Transactions on* , vol.11, no.5, pp.1957-1967, May **2012**.
- [31] S. T. Chung and A. J. Goldsmith, "Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 9, pp.1561–1571, Sep. **2001**.
- [32] M. -S. Alouini and A. J. Goldsmith, "Adaptive modulation over Nakagami fading channels," *J. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 1–2, pp.119–143, May **2000**.
- [33] Zinan Lin; Erkip, E.; Ghosh, M.; , "CTH15-5: Rate Adaptation for Cooperative Systems," *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE* , vol., no., pp.1-5, Nov. 27 2006-Dec. 1 **2006**.
- [34] Muller, A.; Speidel, J.; , "Adaptive Modulation for Wireless Multihop Systems with Regenerative Relays," *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th* , vol., no., pp.1-5, 21-24 Sept. **2008**.
- [35] A. Muller and H.-C. Yang, "Dual-hop adaptive packet transmission systems with regenerative relaying," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 9, no. 1, pp. 234 – 244, Jan. **2010**.
- [36] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, **1996**.
- [37] Brennan, D.G.; , "Linear diversity combining techniques" *Proceedings of the IEEE* , vol.91, no.2, pp. 331- 356, Feb **2003**.
- [38] Andrea Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge Press, **2005**.
- [39] J.G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw Hill, Fourth Edition, **2000**.
- [40] J.M. Torrence, L. Hanzo, "Upper bound performance of adaptive modulation in a slow Rayleigh fading channel," *IEEE Electronics Letters*, Vol. 32, pg 718, April **1996**.
- [41] Vellambi, B.N.; Torabkhani, N.; Fekri, F.; , "Throughput and Latency in Finite-Buffer Line Networks," *Information Theory, IEEE Transactions on* , vol.57, no.6, pp.3622-3643, June **2011**.

- [42] Chen Dong; Lie-Liang Yang; Hanzo, L.; , "Performance Analysis of Multihop-Diversity-Aided Multihop Links Over Nakagami-m Fading Channels", <http://eprints.soton.ac.uk/343477/1/Multihop-Diversity-Nakagami-Buffer-Journal-May-2012.pdf> (June, **2013**).
- [43] L. Tassiulas and A. Ephremides, "Stability Properties of Constrained Queueing Systems and Scheduling for Maximum Throughput in Multihop Radio Networks," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 37, no.12, pp. 1936-1949, **1992**.
- [44] L. Bui, R. Srikant, and A. L. Stolyar, "Novel architectures and algorithms for delay reduction in back-pressure scheduling and routing," in *Proc. IEEE INFOCOM Mini-Conf.*, pp. 2936–2940, **2009**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : MEHMET URCAN
Doğum Yeri : Denizli
Medeni Hali : Bekar
E-posta : mehmeturcan@gmail.com
Adresi : Aselsan A.Ş. MGEO Grubu, Akyurt / ANKARA

Eğitim

Lise : Denizli Anadolu Lisesi, DENİZLİ (1997-2004)
Lisans : Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Bölümü, ANKARA (2004-2008)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce (İleri), Almanca (Başlangıç)

İş Deneyimi

Aselsan A.Ş. : Aviyonik Yazılım Mühendisi (2008-...)

Deneyim Alanları

Gömülü ve Aviyonik Sistemler İçin Yazılım Geliştirme

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu İle Katıldığı Toplantılar

-