

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KLASİK VE AĞ KODLAMALI OFDMA SİSTEMLERDE ALT-TAŞIYICI
ATAMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Buğra ENGİN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KLASİK VE AĞ KODLAMALI OFDMA SİSTEMLERDE ALT-TAŞIYICI
ATAMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Buğra ENGİN
504111309**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim ALTUNBAŞ

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504111309 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Buğra ENGİN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KLASİK VE AĞ KODLAMALI OFDMA SİSTEMLERDE ALT-TAŞIYICI ATAMA**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. İbrahim ALTUNBAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. İbrahim ALTUNBAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Güneş Karabulut KURT
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Murat UYSAL
Özyeğin Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **26 Ocak 2015**

ÖNSÖZ

Tezi hazırlamamda bana her zaman yardımcı olan ve gerekli yönlendirmeleri yapan sayın Prof. Dr. İbrahim Altunbaş'a teşekkürlerimi sunarım. Tezim için bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Güneş Kurt Karabulut'a ve ayrıca Prof Dr. Murat Uysal'a teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince her aşamada bana destek ve moral olan aileme ve Merve Düven'e teşekkür ederim.

Aralık 2014

Buğra Engin
(Telekomünikasyon Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	4
1.2 Literatür Araştırması	4
2. İKİLİ DİYAGRAMLARDA EŞLEME.....	7
2.1 Rastgele İkili Diyagramlar	7
2.2 Rastgele İkili Diyagramlarda Eşleme.....	8
2.2.1 Artırımlı yol ve değişimli yol	10
3. OFDMA SİSTEMLERİNDE KULLANICILARA ALT-TAŞIYICI ATAMA PROBLEMİ	15
3.1 Problem Tanımı	15
3.2 OFDMA Kanal Modeli	16
3.3 Çeşitleme-Çoğullama Ödünleşimi	20
3.4 Kesinti Olasılığı.....	20
4. MAKSİMUM EŞLEME ALGORİTMALARI	23
4.1 RVRHK Algoritması	23
4.1.1 Kesinti formülasyonu	24
4.1.2 Benzetim sonuçları	24
4.2 $\mathcal{H}$ -Eşleme Yaklaşımı.....	26
4.2.1 R^2EHK alt-taşıyıcı atama algoritması	28
4.2.2 R^2EHK algoritmasının adımları	30
4.2.3 R^2EHK algoritmasına ilişkin benzetim sonucu.....	40
4.2.4 Nakagami-m sönümlemeli kanalda benzetim sonuçları	41
5. KULLANICILARA FARKLI SAYIDA ALT-TAŞIYICI ATAMASI.....	47
5.1 Kullanıcı Başına Sabit Bandverimliliği.....	47
5.2 Kullanıcı Başına Değişen Bandverimliliği.....	49
5.3 Çoklu- R^2EHK Algoritması Adımları.....	51
5.4 Kullanıcı Başına Sabit Bandverimliliği ile İlgili Rayleigh ve Nakagami-m Sönümlemeli Kanallardaki Benzetim Sonuçları.....	61
5.5 Kullanıcı Başına Değişen Bandverimliliği ile İlgili Rayleigh ve Nakagami-m Sönümlemeli Kanallardaki Benzetim Sonuçları.....	70
6. AĞ KODLAMALI OFDMA SİSTEMLERİNDE ALT-TAŞIYICI ATAMA	77
6.1 Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemi Tanımı	77
6.2 R^2EHK Algoritmasına İlişkin Rayleigh ve Nakagami-m Kanallardaki Benzetim Sonuçları.....	80

6.3 Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemlerde Kullanıcılara Farklı Sayılarda Alt-taşıyıcı Atama.....	82
6.4 Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemlerinde Çoklu- R^2EHK Algoritmasının Uygulama Adımları	83
6.5 Ağ kodlamalı OFDMA Sistemde Kullanıcı Başına Sabit Bandverimliliği Durumunda Rayleigh ve Nakagami-m Sönümlmeli Kanallardaki Benzetim Sonuçları	92
6.6 Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemde Kullanıcı Başına Değişen Bandverimliliği Durumunda Rayleigh ve Nakagami-m Sönümlmeli Kanallardaki Benzetim Sonuçları	95
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	99
KAYNAKLAR.....	103
ÖZGEÇMİŞ	105

KISALTMALAR

AWGN	: Additive White Gaussian Noise
BFS	: Breadth-first Search
BS	: Base Station
CSI	: Channel State Information
DFS	: Depth-first Search
IP	: Internet Protocol
MAC	: Media Access Control
MS	: Mobile Station
NC	: Network Coding
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
R²EHK	: Random Rotation and Expansion based Hopcroft-Karp
RNC	: Random Network Coding
RVRHK	: Random Vertex Rotation based Hopcroft-Karp
SNR	: Signal-to-Noise Ratio

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bir ikili diyagramdaki düğümlerin durumları.....	9
Şekil 2.2 : Değişimli yol: U_5, S_4, U_4, S_2 , artırılmış yol: $U_5, S_4, U_4, S_2, U_2, S_1$	10
Şekil 2.3 : Artırılmış yol : $U_1, S_2, U_2, S_4, U_4, S_5$. Simetrik fark işlemi sonucunda eşleme sayısının 1 artması.....	11
Şekil 2.4 : Artırılmış yol kullanarak maksimum eşleme elde edilmesi.....	13
Şekil 3.1 : Frekans seçici yavaş sönmülemeli kanallarda bir adet BS ve M kullanıcı bir OFDMA sistemi. (a) $k = 1$, (b) $k = 2$ [4],[5].....	17
Şekil 3.2 : Kullanıcı ve alt-taşıyıcılar arasındaki kanal gösterimleri.....	19
Şekil 4.1 : $M = 2$ ve $N = 2,3$ için maksimum eşleme sonucunda elde edilen kullanıcı kesinti olasılıkları	25
Şekil 4.2 : $M = 3$ ve $N = 3,4$ için maksimum eşleme sonucunda elde edilen kullanıcı kesinti olasılıkları	26
Şekil 4.3 : Örnek rastgele ikili diyagram [6]	30
Şekil 4.4 : İlk 3 adım sonrası oluşan yeni rastgele ikili diyagram.....	31
Şekil 4.5 : 1. eşleme ($1 \rightarrow 1$).....	32
Şekil 4.6 : 2. eşleme, ($2 \rightarrow 1$) – ($1 \rightarrow 2$).....	33
Şekil 4.7 : 3. eşleme, ($3 \rightarrow 2$) – ($1 \rightarrow 1$) – ($2 \rightarrow 3$).....	34
Şekil 4.8 : 4. eşleme, ($4 \rightarrow 3$) – ($2 \rightarrow 1$) – ($1 \rightarrow 2$) – ($3 \rightarrow 4$).....	35
Şekil 4.9 : 5. eşleme, ($4 \rightarrow 3$) – ($2 \rightarrow 1$) – ($1 \rightarrow 2$) – ($3 \rightarrow 4$) – ($5 \rightarrow 7$).....	37
Şekil 4.10 : 6. eşleme, ($4 \rightarrow 3$) – ($2 \rightarrow 1$) – ($1 \rightarrow 2$) – ($3 \rightarrow 4$) – ($8 \rightarrow 5$) – ($7 \rightarrow 6$).....	38
Şekil 4.11 : Çoğullanan düğümlerin eski haline getirilmesi.....	39
Şekil 4.12 : Maksimum $\mathcal{H}$ -eşlenmiş diyagram.....	40
Şekil 4.13 : R^2EHK algoritmasına ilişkin kesinti olasılığı benzetim sonucu.....	41
Şekil 4.14 : $M = 3$ ve $N = 3$ için maksimum eşleme sonucunda Nakagami-m kanallarda elde edilen kesinti olasılığı	42
Şekil 4.15 : $M = 3$ ve $N = 4$ ve $L = 4$ Nakagami-m kanallarda elde edilen kesinti olasılığı	43
Şekil 4.16 : $M = 3$ ve $N = 4$ ve $L = 2$ için Nakagami-m kanallarda elde edilen kullanıcı kesinti olasılığı	43
Şekil 4.17 : $M = 4$ ve $N = 4$ ve $L = 4$ için Nakagami-m kanallarda elde edilen kullanıcı kesinti olasılığı	44
Şekil 4.18 : $M = 4$ ve $N = 4$ ve $L = 2$ için Nakagami-m kanallarda elde edilen kullanıcı kesinti olasılığı	45
Şekil 4.19 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için Nakagami-m kanallarda elde edilen kullanıcı kesinti olasılığı	46
Şekil 5.1 : Kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması için örnek bir rastgele ikili diyagram.....	51
Şekil 5.2 : Kullanıcı düğümlerinin çoğullanması sonucunda oluşan yeni rastgele ikili diyagram.....	52
Şekil 5.3 : 1. eşleme, ($1 \rightarrow 1$)	53
Şekil 5.4 : 2. artırılmış yolu bulma.....	53

Şekil 5.5 : 2. eşleme, $(1 \rightarrow 1) - (2 \rightarrow 5)$	54
Şekil 5.6 : 3. artırılmış yolu bulma	54
Şekil 5.7 : 3. eşleme, $(1 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 5) - (3 \rightarrow 1)$	55
Şekil 5.8 : 4. artırılmış yolu bulma	55
Şekil 5.9 : 4. eşleme, $(1 \rightarrow 1) - (2 \rightarrow 5) - (3 \rightarrow 3) - (4 \rightarrow 2)$	56
Şekil 5.10 : 5. artırılmış yolu bulma	56
Şekil 5.11 : 5. eşleme, $(1 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 5) - (3 \rightarrow 1) - (4 \rightarrow 4) - (5 \rightarrow 3)$	57
Şekil 5.12 : 6. artırılmış yolu bulma	57
Şekil 5.13 : 6. eşleme, $(1 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 6) - (3 \rightarrow 1) - (4 \rightarrow 4) - (5 \rightarrow 3) - (6 \rightarrow 5)$	58
Şekil 5.14 : 7. artırılmış yolu bulma	58
Şekil 5.15 : 6. eşleme, $(1 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 5) - (3 \rightarrow 1) - (4 \rightarrow 4) - (5 \rightarrow 3) - (6 \rightarrow 7) - (7 \rightarrow 6)$	59
Şekil 5.16 : 8. artırılmış yolu bulma	59
Şekil 5.17 : 7. eşleme, $(1 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 6) - (3 \rightarrow 1) - (4 \rightarrow 4) - (5 \rightarrow 3) - (6 \rightarrow 5) - (7 \rightarrow 8) - (8 \rightarrow 7)$	60
Şekil 5.18 : Çoğullanan düğümlerin eski haline getirilmesi	60
Şekil 5.19 : Çoklu- R^2EHK algoritması ile maksimum eşlenmiş diyagram	61
Şekil 5.20 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1\ 1\ 1\ 1]$, $k = [1\ 1\ 1\ 2]$ ve $k = [1\ 1\ 2\ 2]$ durumlarında Rayleigh kanaldaki kesinti olasılığı	62
Şekil 5.21 : $M = 4$, $N = 8$, $L = 2$ için $k = [1\ 1\ 2\ 2]$, $k = [1\ 1\ 3\ 3]$, $k = [3\ 2\ 2\ 1]$ ve $k = 2$ durumlarında Rayleigh kanaldaki kesinti olasılıkları	63
Şekil 5.22 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1\ 1\ 3\ 3]$ durumu için Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı eğrileri	64
Şekil 5.23 : $M = 4$ ve $N = 12$ ve $L = 3$ için $k = [4\ 1\ 4\ 1]$ durumunda Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı eğrileri	65
Şekil 5.24 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3\ 2\ 2\ 1]$ durumlarında Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı eğrileri	66
Şekil 5.25 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1\ 1\ 1\ 1]$, $k = [1\ 1\ 1\ 2]$ ve $k = [1\ 1\ 2\ 2]$ durumlarında Nakagami-m kanaldaki kesinti olasılığı	67
Şekil 5.26 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1\ 1\ 3\ 3]$ ve $k = [3\ 2\ 2\ 1]$ durumlarında Rayleigh ve Nakagami-m kanaldaki ortalama kesinti olasılığı	68
Şekil 5.27 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1\ 1\ 3\ 3]$ durumunda Nakagami-m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı	69
Şekil 5.28 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3\ 2\ 2\ 1]$ durumunda Nakagami kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı	69
Şekil 5.29 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1\ 1\ 3\ 3]$ durumunda Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı	70
Şekil 5.30 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1\ 1\ 3\ 3]$ ve $R = [1.1, 1.1, 3.8, 3.8]$ durumunda Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı	71
Şekil 5.31 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3\ 2\ 2\ 1]$ ve $R = [4, 2.4, 2.4, 1]$ durumunda Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı	72
Şekil 5.32 : $M = 3$ ve $N = 6$ ve $L = 2$ için $k = [2\ 1\ 3]$ ve $R = [2.2, 1, 3.8]$ durumunda Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı	72
Şekil 5.33 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1\ 1\ 3\ 3]$ ve $R = [1\ 1\ 3\ 3]$ durumunda Nakagami-m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı ...	74
Şekil 5.34 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1\ 1\ 3\ 3]$ ve $R = [1.1, 1.1, 3.8, 3.8]$ durumunda Nakagami-m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı ...	74
Şekil 5.35 : $M = 3$ ve $N = 6$ ve $L = 2$ için $k = [2\ 1\ 3]$ ve $R = [2.2, 1, 3.8]$ durumunda Nakagami-m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı....	75
Şekil 6.1 : Ağ kodlamalı sistem modeli	78

Şekil 6.2 : $M = 4$ ve $N = 8$ için ikili hiperdiyagram	80
Şekil 6.3 : $M = 4$, $N = 8$ için R^2EHK algoritmasına ilişkin klasik OFDMA ve RNC-OFDMA sistemlerinin Rayleigh kanaldaki ortalama kesinti olasılıkları	81
Şekil 6.4 : $M = 4$, $N = 8$ için R^2EHK algoritmasına ilişkin RNC-OFDMA sisteminin Nakagami-m kanaldaki ortalama kesinti olasılıkları	82
Şekil 6.5 : Ağ kodlamalı OFDMA sisteminde kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması için olası örnek bir ikili bir diyagram	84
Şekil 6.6 : Kullanıcı düğümlerinin çoğullanması	85
Şekil 6.7 : Kullanıcı düğümlerinin çoğullanması sonrası oluşan yeni diyagram	86
Şekil 6.8 : 1. eşleme, $(1 \rightarrow 1)$	86
Şekil 6.9 : 2. eşleme, $(2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2)$	87
Şekil 6.10 : 3. eşleme, $(3 \rightarrow 2) - (1 \rightarrow 1) - (2 \rightarrow 3)$	87
Şekil 6.11 : 4. eşleme, $(3 \rightarrow 2) - (1 \rightarrow 1) - (2 \rightarrow 3) - (4 \rightarrow 5)$	88
Şekil 6.12 : 5. eşleme, $(5 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4) - (4 \rightarrow 5)$	88
Şekil 6.13 : 6. eşleme, $(6 \rightarrow 5) - (4 \rightarrow 6) - (5 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4)$	89
Şekil 6.14 : 7. eşleme, $(7 \rightarrow 6) - (4 \rightarrow 5) - (6 \rightarrow 7) - (5 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4)$	89
Şekil 6.15 : 8. eşleme, $(8 \rightarrow 7) - (6 \rightarrow 5) - (4 \rightarrow 6) - (7 \rightarrow 8) - (5 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4)$	90
Şekil 6.16 : Çoğullanmış düğümlerin son eşleme durumu	90
Şekil 6.17 : Çoğullanan kullanıcı düğümlerinin eski haline getirilmesi	91
Şekil 6.18 : Çoklu- R^2EHK algoritması ile maksimum eşlenmiş ikili diyagram	91
Şekil 6.19 : $M = 4$, $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 1 \ 1 \ 3]$ durumunda klasik OFDMA ile RNC-OFDMA sistemlerinin Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına ve ortalama kesinti olasılıklarının karşılaştırması	92
Şekil 6.20 : $M = 4$, $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ durumunda klasik OFDMA ile RNC-OFDMA sistemlerinin Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına ve ortalama kesinti olasılıklarının karşılaştırması	93
Şekil 6.21 : $M = 4$, $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 1 \ 1 \ 3]$ durumunda RNC-OFDMA sisteminin Rayleigh ve Nakagami-m kanaldaki kesinti olasılıkları karşılaştırması	94
Şekil 6.22 : $M = 4$, $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ durumunda RNC-OFDMA sisteminin Rayleigh ve Nakagami-m kanaldaki kesinti olasılıkları karşılaştırması	94
Şekil 6.23 : $M = 4$, $N = 8$, $L = 2$ için $k = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ ve $R = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ durumunda klasik OFDMA ve RNC-OFDMA için Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılıkları	96
Şekil 6.24 : $M = 4$, $N = 8$, $L = 2$ için $k = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ ve $R = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ durumunda RNC-OFDMA sisteminde Rayleigh ve Nakagami-m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılıkları	96
Şekil 6.25 : $M = 4$, $N = 8$, $L = 2$ için $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ ve $R = [3.8 \ 2.4 \ 2.4 \ 1.1]$ durumunda kullanıcı başına kesinti olasılıkları karşılaştırması	97
Şekil 6.26 : $M = 4$, $N = 8$, $L = 2$ için $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ ve $R = [3.8 \ 2.4 \ 2.4 \ 1.1]$ durumunda Rayleigh ve Nakagami-m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılıkları	97

KLASİK VE AĞ KODLAMALI OFDMA SİSTEMLERDE ALT-TAŞIYICI ATAMA

ÖZET

Telsiz haberleşmedeki performansı etkileyen en temel unsurlardan olan sönümlleme, güvenilir ve kaliteli bir iletişim için problem teşkil etmektedir. Sönümllemenin yanında iletim hızı, bandverimliliği, kaynak ataması gibi unsurlar da sistemlerin performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Sönümlleme etkisini azaltmak için kullanılan tekniklerden biri olan işbirlikli çeşitleme sayesinde haberleşme sistemlerinin hata performansı, iletim hızından kayıp karşılığında iyileşmektedir. Ağ kodlama tekniği, işbirlikli sistemlerin iletim hızındaki bu kaybı önlemek amacıyla geliştirilmiş ve üzerinde son zamanlarda yoğun biçimde çalışmalar yapılan tekniklerden biridir. Ağ kodlamanın geliştirilmiş bir versiyonu olan rastgele ağ kodlamada ağ düğümlerine gelen veri paketleri, rastgele üretilen katsayılar ile çarpılarak kodlanmaktadır. Böylece rastgele ağ kodlamada, paket kaybına ve gecikmeye karşı daha çok direnç sağlanmaktadır. Aynı zamanda rastgele ağ kodlama ile sistemlerin iletim oranı ve bandverimliliğinin de iyileşmesi sağlanmaktadır. Telsiz haberleşmede, iletim oranı ve bandverimliliği ile yakından ilişkili olan önemli bir problem de kaynak ataması problemidir. Sınırlı frekans bandının sistemde bulunan kullanıcılar tarafından olabildiğince verimli bir şekilde kullanılması gerekmektedir.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Dik Frekans Bölmeli Çoğullama) tekniği, frekans seçici kanallar üzerindeki iletişim güvenilirliği ve esnekliğini geliştirme potansiyeli nedeniyle; halihazırdaki ve gelecek nesil haberleşme sistemleri için önem teşkil etmektedir. OFDM'in çok kullanıcılı iletişim için önemli bir uygulaması da OFDMA'dır (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access, Dik Frekans Bölmeli Çoğullama Erişimi). Özellikle çok kullanıcılı sistemlerde mevcut kaynakları, bandgenişliği sınırlamaları altında en uygun şekilde kullanmak gerekmektedir. Gelişen teknolojinin ve gezgin cihazları kullanan kullanıcı sayısının artmasıyla kaynak ataması, günümüzde büyük bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. OFDMA sistemlerinde kaynak ataması ile ilgili olarak alt-taşıyıcılar kullanılmaktadır ve veriler bu alt-taşıyıcılar aracılığıyla iletilmektedir. Kullanıcılara en uygun şekilde alt-taşıyıcı ataması yapılarak mevcut kapasite en uygun biçimde kullanılabilir. Bir sistemde, alt-taşıyıcı ataması yaparak kullanıcıların mümkün olduğunca az kesinti durumunda kalmaları sağlanmaktadır. Alt-taşıyıcı atamasına ilişkin olarak, bir OFDMA sistemi, diyagram kuramı kapsamındaki rastgele ikili diyagram modeli ile gösterilebilmektedir. Rastgele ikili diyagramlarda, maksimum eşleme yöntemleri ile mevcut alt-taşıyıcılar kullanıcılara, en az sayıda kullanıcıyı kesintide bırakacak şekilde atanabilmektedir. Her kullanıcı, alt-taşıyıcı atanması bakımından aynı fırsata sahip olmaktadır. Rastgele ikili diyagramlarda maksimum eşleme ile alt-taşıyıcı ataması yapmak için Hopcroft-Karp algoritmasını kullanarak geliştirilen *RVRHK* (Random Vertex Rotation based Hopcroft-Karp, Hopcroft-Karp tabanlı Rastgele Düğüm Döndürmesi) algoritması kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, sadece maksimum eşleme

algoritmaları ile alt-taşıyıcı ataması yaparak çeşitleme kazancı elde edilebilmektedir. *RVRHK* algoritmasının yanında, daha genel durumlar için en uygun alt-taşıyıcı ataması yapılması ile ilgili olarak $\mathcal{H}$ -eşleme yaklaşımından yararlanılmıştır. $\mathcal{H}$ -eşleme yaklaşımının ele alındığı alt-taşıyıcı atama algoritması olarak *RVRHK*'nın daha geliştirilmiş hali olan *R²EHK* (Random Rotation and Expansion based Hopcroft-Karp, Hopcroft-Karp tabanlı Rastgele Döndürme ve Çoğullama) algoritması kullanılmaktadır.

Bu tezde, literatürde ilk olarak *RVRHK* ve *R²EHK* algoritmalarının sağladığı performans Nakagami-m kanallar için incelenmiştir. Bunun yanında, farklı kullanıcı ihtiyaçlarına uygun biçimde, Çoklu – *R²EHK* algoritması geliştirilmiştir. Gerçekten de, faydalanan çalışmaların hepsinde kullanıcıların karşılamaları gereken iletim oranı her zaman sabit olarak kabul edilmiştir. Bir OFDMA sistemindeki kullanıcıların farklı servisleri kullanmaları durumunda, her kullanıcının farklı bandgenişliği ihtiyacı olacağından her kullanıcıya atanması gereken alt-taşıyıcı sayısı ve de her kullanıcının karşılaması gereken iletim oranı farklı olmaktadır. Bu nedenle, literatürde ele alınmayan ve diyagram kuramı ile geliştirilen yeni atama yöntemleri geliştirilerek kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı atanması konusu ve kullanıcıların karşılamaları gereken iletim oranlarının farklı olma durumları da tez kapsamında ele alınmaktadır. Sabit sayıda alt-taşıyıcı atamasına göre farklı sayılarda alt-taşıyıcı atamasında, daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcılar, sistemin genel performansını belirlemede baskın olmaktadır. Kullanıcıların karşılaması gereken iletim oranı sabit iken, sistemdeki herhangi bir kullanıcıya diğerlerinden çok daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapıldığında o sistemin genel performansı, her kullanıcıya sabit sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan sistemin genel performansına göre kötüleşmektedir. Buradaki amaç, kullanıcıların ihtiyaçlarına yönelik atama yapmak olduğundan performanstan ödün verilmektedir; fakat kullanıcıların ihtiyaçlarına göre başarılı bir şekilde alt-taşıyıcı ataması yapılabilir. Ayrıca, kullanıcıların karşılaması gereken iletim oranlarının, atanacak olan alt-taşıyıcı sayısı ile orantılı olarak belirlenmesi durumunda tüm kullanıcılar aynı performansı vermektedirler.

Bu tezin son bölümünde, klasik OFDMA sistemi için yapılan analizler, ağ kodlamalı OFDMA sistemlerine genelleştirilmiştir. Ağ kodlamalı OFDMA sistemlerinde, alt-taşıyıcıları kullanıcılara bağlayan yolları göstermek amacıyla ikili bir hiperdiyagram modeli önerilmektedir. Hiperdiyagramlar üzerinden ağ kodlamalı OFDMA sistemlerinde, kullanıcıların kesinti olasılıkları en az olacak şekilde alt-taşıyıcı ataması yapılmaktadır. Ağ kodlamalı bir OFDMA sisteminde, röle kullanımından dolayı elde edilen çeşitleme derecesi, klasik OFDMA sistemlerinde elde edilen çeşitleme derecesine göre artmaktadır. Böylece, kesinti olasılığı da oldukça iyileşmektedir. Tezden elde edilen sonuçlara göre sistemdeki kullanıcıların veri türlerine ve iletim hızlarına göre alt-taşıyıcı ataması yaparak sistemdeki bandgenişliği en uygun şekilde kullanılabilir ve sistem verimi olabildiğince artırılmaktadır. Ağ kodlamalı OFDMA sistemleri daha karmaşık yapıya sahip olduğundan kaynak ataması, hız ve bandverimliliğinin hedeflenen şekilde sağlanması için kullanıcıların ihtiyaçları doğrultusunda alt-taşıyıcı ataması yapmak çok büyük avantajlar sağlamaktadır. Ağ kodlama tekniklerinin, gelecek nesil haberleşme sistemlerinde yer alacağı düşünüldüğünde, bu tez kapsamında önerilen yöntemler ve elde edilen sonuçlar, OFDMA kullanan yeni nesil telsiz haberleşme sistemlerinde alt-taşıyıcı ataması konusuna farklı bir bakış açısı getirmekte ve yeni çalışmalar için fikirler vermektedir.

SUBCARRIER ALLOCATION IN CONVENTIONAL AND NETWORK CODED OFDMA SYSTEMS

SUMMARY

In wireless communications systems, the fading effect, one of the basic factors which degrades the performance, is an important problem for reliable and qualified transmission. Thanks to channel coding and diversity techniques which are used to reduce fading effect. Cooperative diversity is one of the diversity techniques and by using this technique, error performance is improved by sacrificing the data rate. It is a solution for the increasing number of users and the increasing demand for high quality wireless services. The cooperation among mobile users of a wireless system has the potential to provide an increased capacity in comparison with the systems without using cooperation. Network coding is a technique developed to avoid the loss of data rate for cooperative systems and there have been many ongoing researches about this topic in recent years. It is a useful technology that can increase the total throughput of wireless networks and allows intermediate nodes in networks to encode several received packets into a coded packet before forwarding. In random network coding that is a more advanced version of network coding, data packets are encoded by multiplexing with random generated coefficients. Thus, random network coding is more robust against the packet loss and latency. At the same time, transmission rate and bandwidth efficiency of the systems are improved by using this technique. In wireless communications, a problem which is closely related with transmission rate and bandwidth efficiency is resource allocation problem. Basic principle of resource allocation is to maximize the system capacity. By dynamically allocating resources to users in a system, system capacity maximization can be done. Therefore, it is important that restricted frequency band must be used by users effectively as much as possible.

OFDM is a multiplexing technique which subdivides the available bandwidth into multiple orthogonal frequency subbands and has an importance for existing systems and new generation communications systems due to its ability to improve the transmission efficiency and reliability in frequency selective fading channels. OFDM systems are able to maximize spectral efficiency without causing adjacent channel interference. One of the important applications of OFDM for multi-user communications is OFDMA and it is a multiplexing scheme that provides multiplexing operation of user data onto the subcarriers. Especially in the multi-user systems, available sources must be used optimally under bandwidth limitations. The source allocation comes up as a more important problem in recent years due to increasing number of users who use the mobile devices. In OFDMA systems, user data packets are transmitted via subcarriers. Available capacity is used effectively by allocating subcarriers to the users optimally. By this way, outage probability of users can be minimized.

In an OFDMA system, if instantaneous channel capacity is lower than a target transmission rate due to frequency selective slow fading, subcarriers may be in

outage. Besides, if all subcarriers for a user are in outage, that user will also be in outage. So, allocating non-outage subcarriers to users is an important problem for OFDMA systems. In order to solve this allocation problem, an OFDMA system can be represented by using random bipartite graph model which is a subject of graph theory. Random bipartite graphs can be used to analyse the multi-user subcarrier allocation problem over frequency selective slow fading channels. In random bipartite graphs, subcarriers can be allocated to users by employing maximum matching algorithms. This minimizes the user outage probability. Moreover, each user have the same opportunity in terms of subcarrier allocation. In other words, the fairness between the users is guaranteed. *RVRHK* algorithm developed based on the Hopcroft-Karp algorithm can be used for subcarrier allocation with maximum matching in random bipartite graphs. According to the results obtained in the literature, diversity gain can be achieved via maximum matching algorithms. *RVRHK* algorithm takes advantage of the maximum matching technique to resolve the user conflicts in OFDMA systems. In addition, the channel state information needed by this algorithm is only 1 bit/subcarrier/user to resresent the outage scenario. This algorithm allocates only one subcarrier to each suitable user. For more general cases, $\mathcal{H}$ -matching approach is utilized. An improved version of *RVRHK* algorithm is R^2EHK algorithm where $\mathcal{H}$ -matching approach is utilized. In order to guarantee the fairness between users, a randomly rotation operation is performed among users in random bipartite graph for both *RVRHK* and R^2EHK algorithms. By using $\mathcal{H}$ -matching approach in R^2EHK algorithm, equal number of multiple subcarriers can be allocated to users in an OFDMA system as long as each user which is not in outage has same number of subcarriers.

In this thesis, the performances of *RVRHK* and R^2EHK algorithms are investigated for Nakagami- m channels for the first time in literature. The obtained results show that diversity order of the OFDMA systems increases with m parameter for Nakagami- m fading channels. By this way, outage probability is also improved. Besides, Multi- R^2EHK algorithm is developed in accordance with requirements of users. Indeed, in subcarrier allocation solutions via random bipartite graphs, it is generally assumed that user transmission rates are fixed. In case of users in an OFDMA system utilize different services, they may have different bandwidth requirements. So, the number of subcarriers to be allocated to users and the user transmission rates may be different. Therefore, different numbers of subcarrier allocation problem is examined under two headings: fixed bandwidth efficiency per user and variable bandwidth efficiency per user. For the first topic, a fixed bandwidth efficiency is promised for each user, but they have different numbers of subcarriers. So, the user transmission rates will be different according to number of subcarriers allocated. For the second topic, the bandwidth efficiencies of the users will be variable.

In this thesis, a new version of R^2EHK algorithm, which allows different numbers of subcarrier allocation to users, is developed. The proposed algorithm uses the $\mathcal{H}$ -matching approach. By using this new algorithm, different numbers of subcarrier allocation can be done optimally according to the user requirements at the cost of a degradation in the outage performance. The results obtained for fixed bandwidth efficiency by using Multi- R^2EHK algorithm show that the outage probability of users with more number of subcarriers is lower than the others. In addtion, it is shown that the users with less number of subcarriers are dominant in determining general outage performance of the system compared to the users with equal number

of subcarriers. If the bandwidth efficiency is assumed to be fixed, when a user in the system has less number of subcarriers than the others, its user outage performance becomes worse. It is also observed from the results obtained for variable bandwidth efficiency by employing Multi- R^2EHK algorithm, a users with more number of subcarriers should satisfy a higher transmission rate. In this case, the outage probability of this user will be higher than other users. In addition, if the bandwidth efficiency for each user is changed proportionally with the number of subcarriers, all users will have same outage performance.

In the last chapter of this thesis, the analyses given for traditional OFDMA systems are generalized to network coded OFDMA systems. A new bipartite hypergraph model is proposed to represent the connections between users and user/relay subcarriers in the network coded OFDMA systems. As in aforementioned techniques, subcarrier allocation can be done via bipartite hypergraphs by minimizing the user outage probabilities. The proposed Multi- R^2EHK algorithm is used for different numbers of subcarrier allocations. Since one of the main objectives of network coding systems is to improve the transmission rate and bandwidth efficiency, it is important to allocate different numbers of subcarriers for fixed and variable bandwidth efficiency cases in network coded OFDMA systems. Utilizing the relay in the network coded OFDMA system, the diversity order and therefore outage performance can be increased with respect to the traditional OFDMA system. Moreover, available bandwidth can be used efficiently according to the user requirements by this way. Considering the obtained results, it can be argued that the proposed techniques in this thesis will provide a different perspective and new insights into the subcarrier allocation problem of traditional and network coded OFDMA systems.

1. GİRİŞ

Telsiz haberleşme, günümüzde her yerde ve sürekli olarak ihtiyaç duyulan bir alan olmuştur. Son yıllardaki gelişmeler ile beraber gezginlik kavramının artık her alanda kullanılması insanları, telsiz haberleşme alanında yeni yöntemler, teknikler geliştirmeye zorunlu kılmaktadır. Çünkü cep telefonu ve diğer telsiz haberleşmede kullanılan cihazların sürekli olarak artışıyla ve geliştirilmesiyle beraber, haberleşme sistemlerinin çok daha akıllı ve sistematik çalışmaları gerekmektedir.

Özellikle gezgin iletişim sistemleri için sağlıklı veri iletişimini engelleyen en önemli unsur çok yollu sönümlemedir. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerden en çok kullanılanları anten çeşitlemesi, işbirlikli iletişim gibi tekniklerdir. Gezgin haberleşme sistemleri için boyut ve maliyet nedeniyle anten çeşitlemesinin uygulanması her zaman mümkün olmamaktadır. Ancak, hücrel sistemlerin baz istasyonları için anten çeşitlemesinin kullanımı uygundur. İşbirlikli iletişimde ise kaynak, hedef ile olan veri iletişimini üçüncü bir birim olan röle üzerinden yapmaktadır. Röle, gelen veriyi hedefe aktarırken genellikle kuvvetlendir ve aktar ya da çöz ve aktar yöntemlerini kullanmaktadır. Bu teknikler uygun şekilde kullanıldıklarında sönümleme etkisi büyük ölçüde önlenabilmektedir.

İşbirlikli iletişime göre geleneksel depola-ve-ilet tekniğinden farklı olarak, gelen veriyi tekrar göndermeden önce, ağ düğümlerinde kodlama yapan bir teknik olarak ağ kodlama (Network Coding, NC) yapısı, R. Ahlswede [1] tarafından ilk kez önerilmiştir. Bu yöntemde, kaynaklardan çoklu alıcılara veri yayılımının hızını artırmak ve ağ iletim bandgenişliğinden daha verimli şekilde yararlanmak amaçlanmaktadır. Ağ kodlama, bir ağdaki ara düğümlerde, farklı noktalardan gelen bilgileri karıştırma/birleştirme işlemidir. Bir ağ topolojisinin kapasitesini çok noktaya yayın yapma anlamında artıran genelleştirilmiş bir yönlendirme yapısıdır. Böylece, sistemin hem verimi hem de hızı artmış olmaktadır. Ağ kodlama yöntemlerinden biri olan rastgele ağ kodlama (Random network coding, RNC), ağ topolojisinden

bağımsız olarak çalışmaktadır ve klasik ağ kodlamanın sağlamadığı bir takım avantajları da sağlamaktadır. RNC'nin önemli bir avantajı, ara düğümlerin, gelen paketlerin hangi alıcılarda kayba uğradığını bilmesine gerek olmamasıdır. Her paket için klasik ağ kodlamada olduğu gibi tam geribesleme (full feedback) kullanmaya gerek yoktur.

RNC, OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing, Dik frekans bölmeli çoğullama) sistemleri ile de bir arada kullanılabilir. OFDM'in, sönümlemeli kanallarda iletim verimini ve güvenilirliğini artıran bir teknik olduğu bilinmektedir [2]. OFDM tabanlı çoklu erişim tekniği olan OFDMA (Orthogonal frequency-division multiplexing access), çok kullanıcıli telsiz haberleşme sistemleri için oldukça uygun bir tekniktir. OFDMA'nın avantajlarından yararlanarak RNC kullanımı ile mevcut bandverimliliği en uygun şekilde kullanılmaktadır. Aynı zamanda sistemin verimi artmaktadır. Bunlar yanında, kaynak ataması konusu da bu sistemler için son derece önemlidir. OFDMA sistemlerinde, dinamik olarak alt-taşıyıcı ataması yaparak sistem kapasitesini, belli güç sınırlamaları altında gücü ve iletim hızını maksimize etmek amaçlanmaktadır. Aynı zamanda, alt-taşıyıcı ataması durumunda kullanıcılar arasında sağlanması gereken, her kullanıcının baz istasyonuna erişiminde eşit fırsata sahip olması anlamındaki adalet (fairness) kavramı ön plana çıkmaktadır [3]. OFDMA sistemlerinde, alt-taşıyıcı ataması yapılması durumunda hem frekans çeşitlemesi hem de frekans çoğullaması aynı anda elde edilebilmektedir. Ancak, frekans çeşitlemesi ve frekans çoğullaması aralarında bir ödünleşim (tradeoff) olmak üzere elde edilmektedir. Bu ödünleşim, bir OFDMA sisteminin belirli bir çoğullama (multiplexing) kazancında ne kadar çeşitleme (diversity) kazancı elde edebileceği anlamına gelmektedir ve çeşitleme-çoğullama ödünleşimi (diversity-multiplexing tradeoff) olarak adlandırılmaktadır. Ağ kodlamalı sistemlerdeki temel amaç, iletim hızını ve sistem verimini artırmak olduğundan bu sistemlerde sınırlı frekans bandını mümkün olduğunca verimli kullanmak gerekmektedir. Ağ kodlamalı sistemler, hücre yapısına göre daha homojen bir yapıda olabileceğinden, ağ daha karmaşık bir hale gelmektedir. Bundan dolayı, ağ kodlamalı OFDMA sistemlerinde yapılacak olan alt-taşıyıcı ataması, frekans bandını verimli kullanmak adına çok önemlidir. Yeni nesil haberleşme sistemlerinde yer alması beklenen ağ kodlamalı OFDMA sistemlerinde, kullanıcıların iletecekleri veri türleri ve boyutları çok farklılık gösterebilir. Aynı zamanda, oluşacak olan karmaşık haberleşme ağı nedeniyle birim

zamanda daha fazla veri aktarımı olacaktır. Bu koşullarda iletişimi en iyi şekilde sağlayabilmek için alt-taşıyıcı atamasının kullanıcılar için farklı sayıda ve adaletli olması gerekmektedir.

OFDMA sistemlerinde dinamik olarak alt-taşıyıcı ataması yapmak için literatürdeki bir takım çalışmalarda diyagram kuramından (graph theory) faydalanılmıştır [3], [4], [5], [6]. Diyagram kuramı kapsamındaki rastgele ikili diyagramlarda (random bipartite graphs) eşleme (matching) yöntemlerinden maksimum eşleme (maximum matching) algoritmaları ile kullanıcılar ve alt-taşıyıcılar arasında eşleme yapılarak kullanıcılara en uygun şekilde alt-taşıyıcı ataması yapılabilmektedir. Bu şekilde kullanıcılar arasında bir adalet durumu sağlanırken aynı zamanda en uygun çeşitleme-çoğullama ödünleşimi de elde edilmektedir [6]. Bu sayede, kullanıcılar mümkün olduğunca az kesinti durumunda kalmaktadırlar. Literatürdeki bu konu ile ilgili çalışmalarda kullanıcı başına atanacak alt-taşıyıcı sayısı sabit olarak ele alınmıştır. Ayrıca, çalışmalarda kullanıcı başına karşılanması gereken bandverimliliği veya iletim hızı oranları da sabit kabul edilmiştir. Ancak, yeni nesil haberleşme sistemlerinin de gelişmesi ile beraber kullanıcıların farklı servislere olan ihtiyaçları artmaktadır. Bu nedenle, kullanıcılar farklı servislerden yararlanırken ihtiyaç duydukları bandgenişliği, iletim hızı oranı da farklı olabilmektedir. Bu tez kapsamında, bu ihtiyaçlara yönelik olarak mevcut algoritmalar geliştirilerek yeni alt-taşıyıcı atama algoritmaları önerilmiştir. Kullanıcıların ihtiyaçlarına yönelik olarak, farklı sayılarda alt-taşıyıcı atanması ve kullanıcı başına karşılanması gereken farklı bandverimliliği ve iletim hızı durumları da göz önüne alınarak elde edilen sonuçlar incelenmektedir. Bu sonuçlarda, sistemin genel performansı ve kullanıcı başına performanslar karşılaştırılmıştır. Ayrıca kullanıcıların, sistemin genel performansına olan etkileri de göz önüne alınmaktadır. Klasik OFDMA sistemlerinin yanı sıra gelecek nesil haberleşme sistemlerinde yer alması beklenen ağ kodlamalı OFDMA sistemleri için alt-taşıyıcı atama problemi, mevcut kaynakları en verimli şekilde kullanmak anlamında büyük bir önem teşkil etmektedir. Bu tezde önerilen yeni algoritmalar ile ağ kodlamalı OFDMA sistemlerinde alt-taşıyıcı atama optimum şekilde yapılabilmektedir ve klasik OFDMA sistemlerinde elde edilen çeşitleme derecesinden daha yüksek çeşitleme dereceleri elde edilmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezde önerilen yöntemle, klasik OFDMA ve ağ kodlamalı OFDMA sistemlerinde dinamik olarak alt-taşıyıcı ataması yapılarak sistemdeki kullanıcıların minimum düzeyde kesintide kalmaları sağlanmaktadır. Bunu sağlarken, mevcut bandgenişliği en uygun şekilde kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak kullanıcıların farklı ihtiyaçlarına yönelik olarak alt-taşıyıcı ataması yapılmaktadır. Kullanıcıların ihtiyaçları doğrultusunda, kullanıcı başına farklı parametreleri de konuya dahil ederek daha gerçekçi bir yaklaşım ile OFDMA kullanan yeni nesil haberleşme sistemlerinde alt-taşıyıcı ataması yapılması konusunda daha fazla fikir verilmesi amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Tez kapsamında yapılan literatür araştırmasında faydalanan kaynaklardan [7]'de, ağ kodlama ile ilgili olarak kablosuz örgü ağlar (mesh network) için yeni bir mimari önerilmiştir. Bu çalışmada ele alınan sisteme göre, paketleri iletmek için yönlendiriciler (router) farklı kaynaklardan gelen paketleri XOR-işlemi kullanarak her iletimdeki bilgi miktarını artırmak için karıştırmaktadırlar. Paketleri karıştırarak iletmek ağ verimini artırdığı görülmüştür. Çalışma kapsamında ayrıca IP (Internet Protocol) ve MAC (Media access control) katmanları arasında çoklu paketler iletmek için kodlama olanaklarını sezerek bu olanakları kullanabilen bir kodlama katmanı eklenmiştir. Bu yapının, kablosuz ağlar için aktarılan veri miktarını maksimize etmek adına önemli bir adım teşkil ettiği söylenebilir. Fakat bu çalışmada OFDMA kanallardan bahsedilmemiştir. [8]'deki çalışmada, iki problem üzerinde durulmuştur. Bu problemlerden biri, ağ kodlamanın çok kanallı ağlarda işbirlikli çeşitlemeden verimli bir şekilde nasıl yararlanacağını net olmamasıdır. Diğer problem ise çoklu-kanallı ağlarda çoklu-kullanıcı çeşitlemesini, işbirlikli çeşitlemeyi ve ağ kodlamayı içeren hedeflenmiş kazançların pratik olarak nasıl sağlanacağıdır. Ayrıca, farklı kazanç biçimlerini karşılamak amacıyla OFDMA ağlarında röle ataması, röle stratejisi seçimi, kanal ataması ve güç atamasını bir arada düşünen bir optimizasyon yapısı formüle edilmiştir. [9]'da, OFDM ağlarda ağ kodlanmış iki-yönlü aktarım performansı üzerinde durulmuştur. Geleneksel yöntem ile önerilen yöntem karşılaştırılmıştır. Röle seçim algoritması olarak Neuro-Fuzzy algoritması kullanılmıştır. Bu çalışmada sistemin kesinti olasılığı incelenmiştir; fakat alt-taşıyıcı

atama ve bununla ilgili kesinti olasılıkları incelenmemiştir. [10]'da OFDMA'deki önemli sorunlardan biri olan çoklu frekans bantları olarak adlandırılan alt-taşıyıcıların kullanıcılara atanması incelenmiştir. OFDMA'deki frekans ve çok kullanıcı çeşitlemelerinin avantajları kullanılarak statik atamaya oranla daha yüksek kapasiteler elde etmek amacıyla dinamik alt-taşıyıcı ataması yöntemleri incelenmiştir. Bunun yanında, çeşitleme kazancı ve ağ kodlama avantajı arasındaki ödünleşmeye değinilmiştir. Bu ödünleşmenin verimlilik ve adalet açısından ağ performansına etkisinin oldukça önemli olduğu belirtilmiştir. Burada önerilen algoritma, ağ kodlama ile farklı mobil istasyonlara (Mobile station, MS) doğru aşağı bağlantı (downlink) yönündeki verileri birleştirmekte ve ardından bu verileri aynı alt-taşıyıcı grubu aracılığıyla yaymaktadır. Sonuç olarak OFDMA sistemlerinin band verimliliği artmakta; fakat diğer yandan da kodlama avantajı ile çeşitleme kazancı arasında bir ödünleşme olmaktadır. [11]'de OFDMA kullanan kablosuz bir ağ üzerinde RNC'li çok noktaya yayın (multicast) yapısı incelenmiştir. Hedeflenen verimi yakalamak için ağdaki toplam iletim gücünü en aza indirmek adına bir katmanlar arası (cross-layer) kaynak atama yöntemi önerilmiştir. RNC kullanılarak gerçekleştirilen bir düğüm seçme yöntemi ile birleştirilen Greedy güç ve alt-taşıyıcı atama algoritması kullanılmıştır. Fakat bu çalışmada alt-taşıyıcı atamasına ait kesinti olasılığına değinilmemiştir. [12]'deki çalışmada iki yönlü OFDM röleli ağlar için yeni bir kaynak ataması yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde iki birim, verileri çoklu röleler yardımıyla paylaşmaktadır. Ayrıca alt-taşıyıcılar ve bu taşıyıcıların güçleri rölelere toplam kapasiteyi maksimize edecek şekilde atama yapılmaktadır. Önerilen bu yöntem, geleneksel yöntemlere göre ve de Greedy atama yapısına göre alt-taşıyıcı başına daha yüksek kapasite sağlamaktadır. Bu çalışmada da alt-taşıyıcılara ait kesinti olasılığından bahsedilmemektedir. [13]'te OFDMA sistemlerinde dinamik kaynak ataması ile ilgili olarak adalet kavramı ve fırsatçı planlama (opportunistic scheduling) üzerinde durulmuştur. [14]'te dinamik alt-taşıyıcı ataması ile OFDMA sistemlerin kapasitesinin artması ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir; fakat kullanıcılar ile ilgili olarak kesinti olasılıklarına yer verilmemiştir. [15]'te kaynak/alt-taşıyıcı atama yöntemlerinin temel prensibinin, sistemin kapasitesini maksimize etmek olduğundan ve de gecikme (latency), hız, adalet ve toplam güç sınırlamaları altında dinamik olarak güç ve alt-taşıyıcı ataması yaparak sistemin performansını artırmak olduğundan bahsedilmiştir. Aşağı bağlantı OFDMA sistemlerinde adalet garantisi ile iletim hızını maksimize etmek için çok kullanıcıli çeşitlemenin kullanımı

ile ilgili çalışmalar [16]'da verilmiştir. Yine OFDMA aşağı-bağlantı kanalları için bazı kaynak atama ve planlama (scheduling) algoritmalarından [17]'de bahsedilmiştir. OFDMA sistemlerini modellemede kullanılan ikili diyagramlar için [18]'den faydalanılmıştır. OFDMA kanallar için bu rastgele ikili diyagram modeli ilk kez [3]'te kullanılmıştır. Bu çalışmada OFDMA sistemlerinde alt-taşıyıcı ataması yapılarak yüksek derecede frekans çeşitlemesi elde edilmesi üzerinde çalışılmıştır. Aynı zamanda kullanıcı kesinti olasılıklarını minimum yapmak için maksimum eşleme algoritmalarından olan Hungarian algoritması [19] kullanılmıştır. Bu çalışmada çoğullama üzerinde durulmamıştır, OFDMA sistemleri sadece çeşitleme açısından incelenmiştir. [4]'te OFDMA sistemlerindeki en uygun çeşitleme-çoğullama ödünleşimi üzerinde durulmuştur. [3]'ten farklı olarak bu çalışma kapsamında sadece frekans çeşitlemesi değil aynı zamanda frekans çoğullaması da incelenmiştir. OFDMA sistemlerinde bir alt-taşıyıcının kesinti durumunu simgelemek için bir-bitlik kanal durum bilgisi (channel state information, CSI) kullanarak OFDMA sistemi ilişkili rastgele bir ikili diyagram modeli ile gösterilmiştir [5]. Bu çalışmada OFDMA sistemlerinde kullanıcılara maksimum düzeyde alt-taşıyıcı ataması yapılması üzerinde durulmuştur; fakat burada çeşitleme-çoğullama ödünleşimi üzerinde durulmamıştır. Maksimum eşleme algoritması olarak Hopcroft-Karp [20] algoritmasına dayalı bir algoritma geliştirilmiştir. Alt-taşıyıcı sayısı kullanıcı sayısının iki katına eşit veya iki katından fazla olduğu durumlardaki maksimum eşleme durumu göz önüne alınmamıştır. [6]'da ise [5]'teki eksiklikler giderilmiştir. OFDMA sistemlerinde çeşitleme-çoğullama ödünleşimi incelenirken aynı zamanda kullanıcı kesinti olasılığını en aza indirmek için maksimum eşleme algoritması daha da geliştirilmiş ve alt-taşıyıcı sayısının kullanıcı sayısının iki katı veya iki katından fazla olduğu durumlar için yeni bir yöntem önerilmiştir. Ancak, bu çalışmaların hepsinde kullanıcı başına karşılanması gereken iletim hızı oranı ve kullanıcı başına atanacak alt-taşıyıcı sayısı her zaman sabit kabul edilmektedir. Kullanıcı başına değişen hız oranları ve kullanıcı başına farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması incelenmemiştir. [21] ve [22]'de ikili diyagramlarda eşleme yaparken kullanılan Mesafe öncelikli arama (Breadth-first search, BFS) ve Derinlik öncelikli arama (Depth-first search, DFS) yöntemlerinin kullanımlarından bahsedilmiştir. Bu çalışmada $\mathcal{H}$ -eşleme ($\mathcal{H}$ -matching) [23] yaklaşımından yararlanılmıştır ve bu şekilde maksimum eşleme yapılmaktadır. [24]'te bulunan sistem modeli de tezin son bölümündeki ağ kodlamalı OFDMA sistemi için ele alınmaktadır.

2. İKİLİ DİYAGRAMLARDA EŞLEME

2.1 Rastgele İkili Diyagramlar

Rastgele ikili diyagramlar, düğüm (vertex) seti V , V_1 ve V_2 olan, farklı bölümlerde iki farklı alt kümeyi içermek üzere her bir bağlantının (edge, e) iki farklı alt kümenin düğümlerini birbirine bağladığı diyagramlardır. E , bağlantı setini belirtmek üzere ve $V = V_1 \cup V_2$, $V_1 \cap V_2 = \emptyset$ koşullarıyla ikili diyagramlar genel olarak $G(V_1 \cup V_2, E)$ şeklinde gösterilebilir. İkili bir diyagram, eğer farklı bölümlerdeki her düğüm birbirine bağlı, yani bitişik (adjacent) ise tam diyagram (complete graph) olarak adlandırılır. Farklı bölümlerde M adet ve N adet düğüm içeren ikili diyagram $K_{M,N}$ olarak gösterilir. Eğer v' düğümü ve v düğümü birbirine bitişik ise v' düğümü v 'nin komşu düğümü olarak tanımlanır. Bir v düğümünün bütün komşu düğümleri $\mathcal{N}(v) \subset V$ seti ile gösterilmektedir. $\mathcal{N}(v)$ 'in kardinalitesi, yani v düğümüne ait bağlantı sayısı, v düğümünün derecesi olarak adlandırılır ve $\deg(v)$ ile gösterilir.

Bu çalışmada alt kümelerden biri kullanıcı kümesi U , diğer alt küme ise alt-taşıyıcı kümesi S olarak tanımlanmıştır. U kümesindeki her bir düğüm bir kullanıcıyı, S kümesindeki her bir düğüm de bir alt-taşıyıcıyı temsil etmektedir. Buradan da açıkça anlaşılabileceği gibi $V = U \cup S$ ve $U \cap S = \emptyset$ dir. $u_m \in U$, $m = 1, \dots, M$ ve $s_n \in S$, $s = 1, \dots, N$ olmak üzere s_n düğümü u_m düğümü için belli bir olasılık değerine göre bağlanır. Eğer s_n , u_m için müsait ise bu iki düğüm bir bağlantı ile birbirine bağlanır. Aksi taktirde, aralarında herhangi bir bağlantı olmaz. Buna göre, $\mathcal{N}(u_m)$ terimi u_m 'in bağlı olduğu tüm alt-taşıyıcıların kümesini göstermektedir.

$G(V_1 \cup V_2, E)$ gerçekleştirilmesine göre baz istasyonu, $\mathcal{N}(u_m)$ içerisinde bir alt-taşıyıcıyı u_m kullanıcıya atamak için bir karar vermektedir. Bu kararı verirken o kullanıcı için müsait olan alt taşıyıcılardan hangilerini seçmesi gerektiğini saptaması gerekmektedir. Bu şekilde oluşturulan bağlantı kümesi eşleme (matching) olarak adlandırılır ve $\mathcal{M}$ ile gösterilir. Bu eşleme mümkün olduğunca az sayıda kullanıcıyı kesinti durumunda bırakmayı garanti etmelidir. Bu da kullanıcı kesinti olasılığını

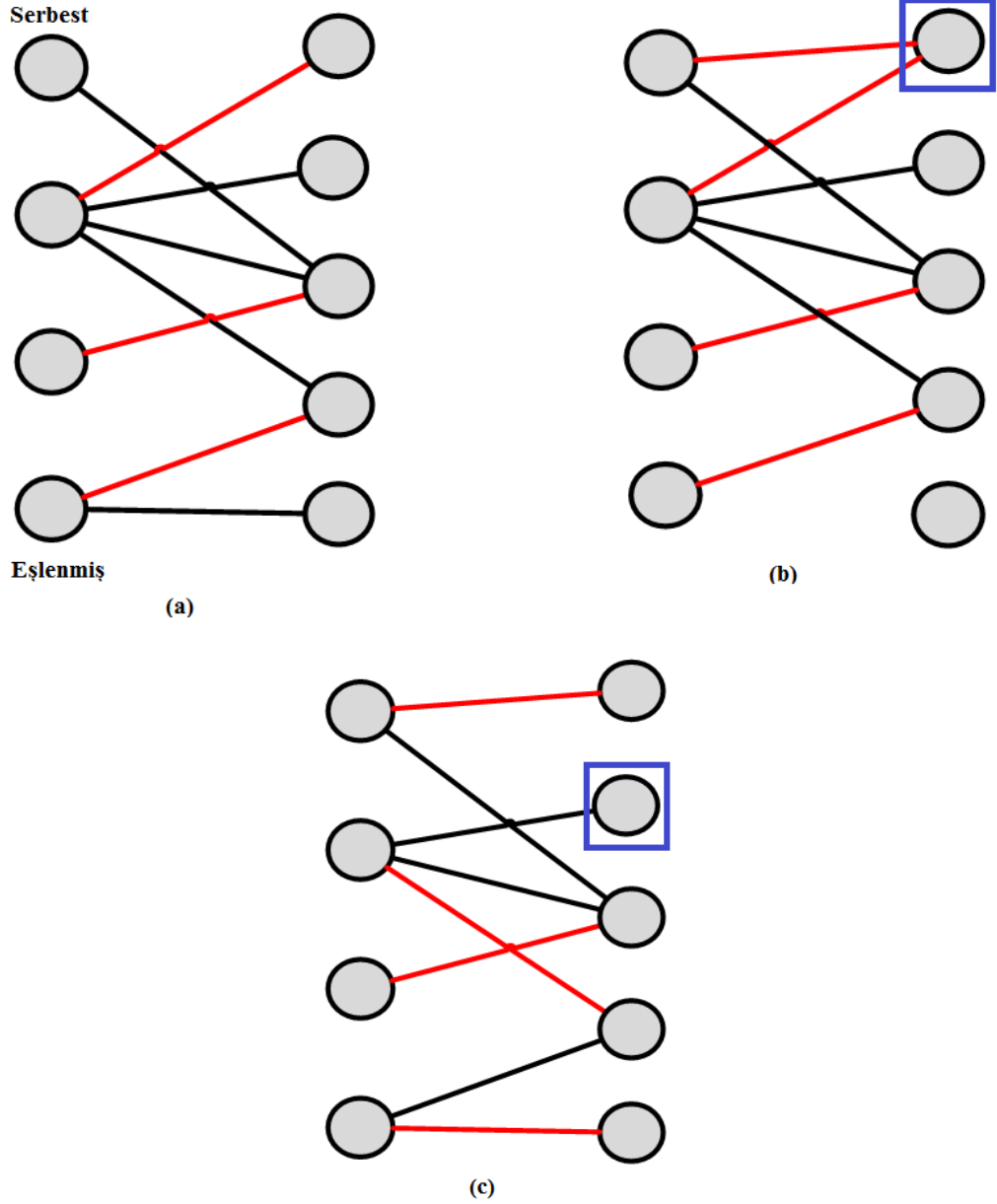
minimum yapmak demektir. Bu kriter, [5]'te minimum kesinti olasılığı kriteri (minimum outage probability criterion) olarak adlandırılmıştır. Ayrıca, her kullanıcı aynı iletim olanağına sahip olmalıdır; yani her kullanıcı arasında bir çeşit adalet durumu sağlanmalıdır. Bu da her kullanıcının aynı kesinti olasılığına sahip olması gerektiği anlamına gelir. Bu kritere adalet kriteri (fairness criterion) adı verilmektedir. Bir kullanıcı için kesinti olasılığı P_{u_m} 'in, tüm kullanıcılar için aynı olması gerektiğinden basitlik açısından kullanıcı kesinti olasılığı genel olarak P_U kullanılabilir. Bu bilgilere dayanarak bu çeşit bir eşleme yönteminin OFDMA sistemlerinde bir frekans çeşitlemesi sağlayabileceği görülmektedir.

Diyagram kuramına göre ikili bir diyagramda $\mathcal{M}$ eşlemesi, e bağlantı kümesi E 'nin bir alt kümesidir. $\mathcal{M}$ eşlemesinde bulunan herhangi iki bağlantının eşleme yapılan S kümesinde ortak uçları bulunamaz; yani herhangi iki kullanıcı aynı alt-taşıyıcıya atanamaz. $\mathcal{M}$ eşlemesinde bulunan bir e bağlantısı, $\mathcal{M}$ altında eşlenmiş demektir. Eğer $\mathcal{M}$ eşlemesi bir u_m ya da s_n 'i içeriyorsa o u_m ya da s_n için $\mathcal{M}$ – saturated denilmektedir, aksi taktirde u_m ya da s_n için $\mathcal{M}$ – unsaturated denilmektedir. Eğer diyagramdaki tüm düğümler $\mathcal{M}$ – saturated ise; yani açıkta hiçbir düğüm kalmayacak şekilde eşleme yapılmışsa o durumdaki eşlemeye eksiksiz eşleme (perfect matching) adı verilir. Buradaki temel amaç, minimum kesinti olasılığını elde etmek $G(V_1 \cup V_2, E)$ 'deki en az sayıda düğümü açıkta bırakacak maksimum eşlemeyi bulmaktır.

2.2 Rastgele İkili Diyagramlarda Eşleme

İkili diyagramlarda eğer bir düğüm $\mathcal{M}$ 'deki herhangi bir bağlantı ile ilişkiliyse o düğüm eşlenmiş (matched) demektir; aksi taktirde o düğüm serbest (free) düğüm olarak adlandırılır. Şekil 2.1'de örnek bir diyagram görülmektedir. Kırmızı çizgiler ile gösterilen bağlantılar $\mathcal{M}$ eşlemesini göstermektedir. Şekil 2.1(a) 'da görüldüğü gibi $\mathcal{M}$ içerisinde olmayan düğüm serbest düğüm olarak, $\mathcal{M}$ 'nin bağlantıları ile ilişkili olan bir düğüm de eşlenmiş olarak gösterilmiştir. Ayrıca ikili diyagramlar ile önemli başka bir nokta da, eşleme sonucunda bir kullanıcı düğümünün ancak karşı taraftaki bir alt-taşıyıcı düğümü ile eşlenebilmesi, iki adet kullanıcı düğümünün aynı alt-taşıyıcı düğümü ile eşlenememesidir. Şekil 2.1(b)'deki örnek eşmelede ise mavi kutucuk içerisindeki düğüme ait iki adet bağlantı görülmektedir. Kullanıcı düğümlerinin sol taraftaki düğümler olduğu ve alt-taşıyıcı düğümlerinin sağ taraftaki

düğüm olduğu varsayalım. Bu durumda bu eşleme doğru bir eşleme değildir. Şekil 2.1(c)'deki eşlemede ise mavi kutucuk içindeki düğüm açıkta kalmıştır, bu yüzden bu eşleme eksiksiz eşleme değildir. Bu çalışmada rastgele ikili diyagram modeli kullanılmaktadır. Rastgele ikili diyagram modelinde düğüm sayıları sabittir; ancak her bağlantı bir olasılık değerine göre oluşmaktadır.

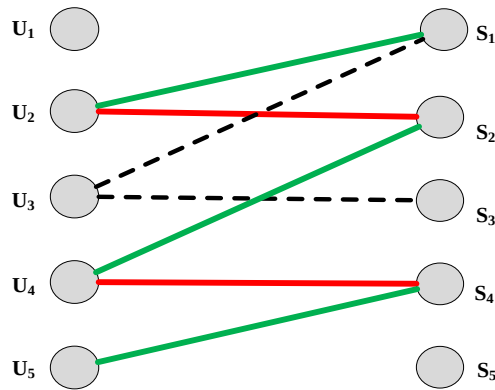


Şekil 2.1 : Bir ikili diyagramdaki düğümlerin durumları.

2.2.1 Artırılmış yol ve değişimli yol

İkili diyagramlarda maksimum eşlemeyi sağlamak amacıyla değişimli yol (alternating path) ve artırılmış yol (augmenting path) yapılarından yararlanılmaktadır. Serbest bir düğümden başlayarak bulunan bir yol (path) için eğer o yolun sahip olduğu bağlantılar alternatif olarak mevcut $\mathcal{M}$ eşlemesindeki bir bağlantı ve eşleme dışındaki bir bağlantı ile yer değiştiriyorsa bu yola değişimli yol ya da $\mathcal{M}$ – alternating denilir. Eğer bir yol serbest bir düğüm ile başlayıp serbest bir düğüm ile sonlanan en büyük $\mathcal{M}$ -alternating yolu ise bu yola artırılmış yol ya da $\mathcal{M}$ -augmenting adı verilir.

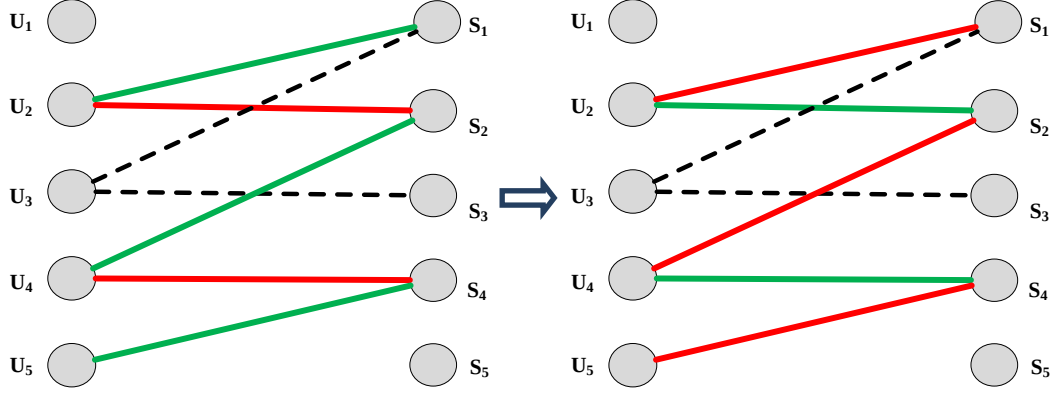
Şekil 2.2’de değişimli yol ve artırılmış yola ilişkin bir örnek gösterilmiştir. Diyagramdaki kırmızı bağlantılar eşlemeye ait bağlantılardır. Yeşil bağlantılar ve kesik çizgili olan bağlantılar ise eşleme dışındaki bağlantılardır. U_1 düğümünden başlanarak bulunan U_5, S_4, U_4, S_2 yolu bir değişimli yoldur. $U_5, S_4, U_4, S_2, U_2, S_1$ yolu ise bir artırılmış yoldur. Çünkü bu yol U_5 serbest düğümüyle başlayıp S_1 düğümü ile sona ermiştir.



Şekil 2.2 : Değişimli yol: U_5, S_4, U_4, S_2 , artırılmış yol: $U_5, S_4, U_4, S_2, U_2, S_1$

Bir eşlemenin maksimum olarak nitelendirilmesi, Berge’s Kuramı [25] ile belirlenir. Bu kurama göre, bir $\mathcal{M}$ eşlemesi, sadece ve sadece eğer G hiç bir $\mathcal{M}$ -augmenting yolu içermiyorsa maksimumdur. Bir $\mathcal{M}$ -augmenting yolu P var olduğunu varsayalım, $M \oplus P$ işlemi simetrik farkını (symmetric difference) göstermek üzere, P bir $\mathcal{M}$ -augmenting yolu olduğundan, $M \oplus P$ ifadesi de G ’ye ait bir eşlemedir. Matematikte, iki kümenin simetrik farkı o kümelerde olup o kümelerin kesişiminde olmayan elemanlar kümesi anlamına gelmektedir. Simetrik fark işlemi

uygulandıktan sonra $|M \oplus P| = |M| + 1$ olmaktadır [26]. Buna göre, artırımıllı yollara simetrik fark işlemlı uygulandıktan sonra mevcut eşleme sayısı 1 artmaktadır.



Şekil 2.3 : Artırımıllı yol : $U_5, S_4, U_4, S_2, U_2, S_1$. Simetrik fark işlemlı sonucunda eşleme sayısının 1 artması.

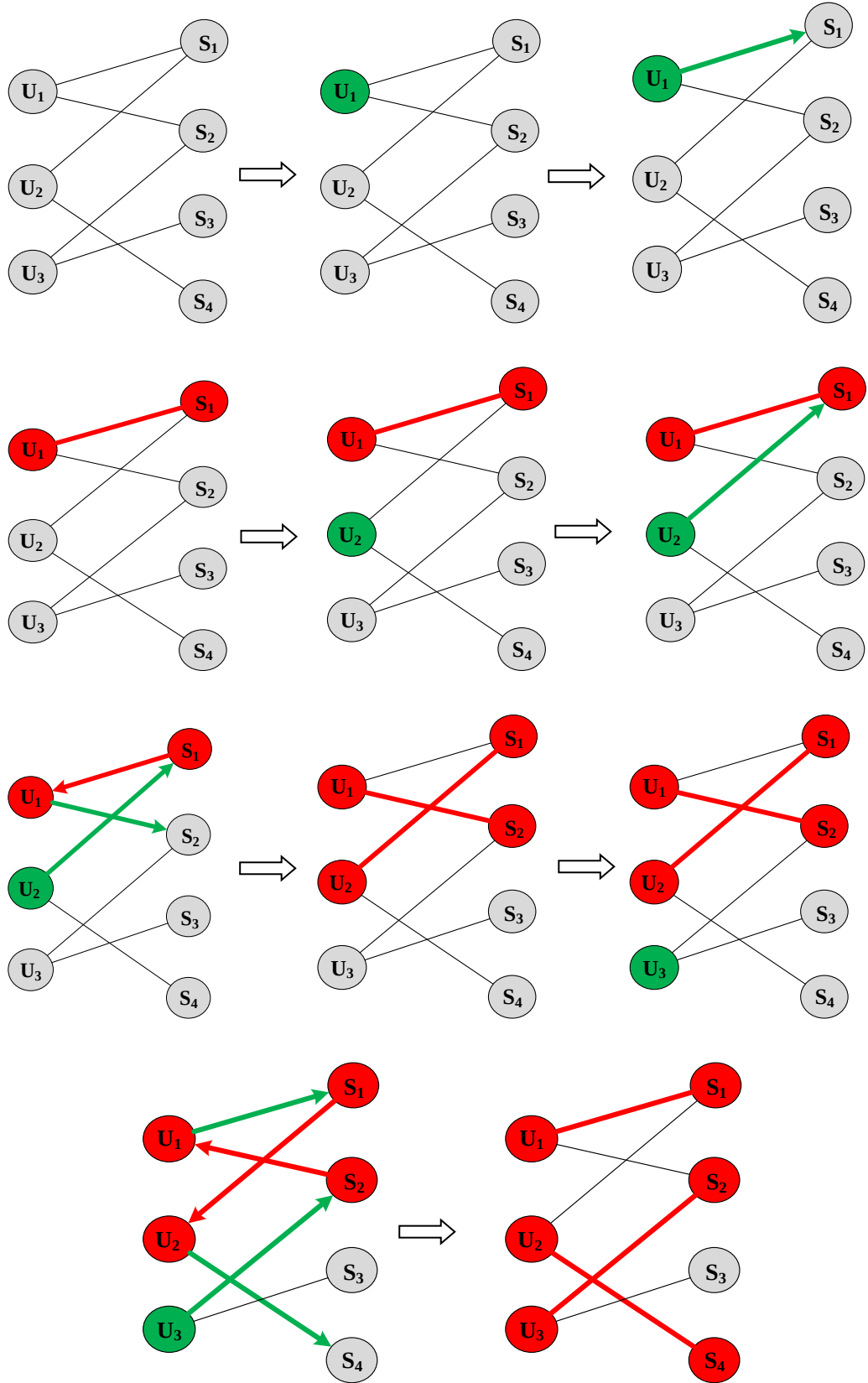
Şekil 2.3'te, Şekil 2.1'deki diyagrama ilişkin simetrik fark işlemlı için bir örnek gösterilmektedir. Artırımıllı yol üzerinden yapılan simetrik fark işlemlı sonrasında; yani kırmızı ve yeşil çizgilerin yer değiştirmeleri sonucunda sağ taraftaki diyagramdaki eşleme elde edilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere kırmızı bağlantıların sayısı, yani eşlemenin sayısı 1 artmıştır. Artırımıllı yol kullanarak maksimum eşlemeyi bulmak için aşağıdaki gibi bir algoritma düşünülebilir [26]:

İkili bir diyagram $G(V_1 \cup V_2, E)$ verilsin,

1. $M \leftarrow \emptyset$
2. **for** V_1 kümesindeki her bir düğüm
 - {
 - if** düğüm serbest
 - {
 - O düğümünden başlayarak bir p artırımıllı yolu bul.
 - if** p bulundu
 - p için simetrik fark işlemlıni uygula, $M \leftarrow M \oplus p$.
 - }
 - }
3. **return** M .

Maksimum eşlemeye ait bir örnek Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Burada her bir U, S düğümü için BFS uygulanmaktadır. Eğer U düğümü serbest ise bu U düğümünden başlanarak bir artırımlı yol oluşturulmakta ve eğer bir artırımlı yol var ise bu yola göre simetrik fark alınarak yeni eşleme bulunmaktadır. Verilen algoritma, bir sonraki safyada yer alan Şekil 2.4'teki diyagram üzerinde uygulanmıştır.

Şekildeki yeşil renkli düğümler serbest düğümleri, kırmızı renkli düğümler de ziyaret edilen (visited) düğümleri göstermektedir. Kırmızı bağlantılar eşlemeleri, yeşil bağlantılar ise diyagram üzerinde gidilen yolları göstermektedir. Burada, serbest düğümlerden başlanarak artırımlı yol bulunmaktadır. Eğer bulunan artırımlı yol bir önceki adımda bulunan eşlemeye ait bağlantıları da içeriyorsa simetrik fark işlemi uygulanarak yeni eşleme bulunmaktadır. Simetrik fark işleminde yeşil ve kırmızı bağlantıların yerleri değiştirilmektedir. Görüldüğü gibi artırımlı yollar eşleme sayısını her adımda 1 artırmaktadır ve yeni bir artırımlı yol bulunamadığı anda da algoritma sonlanmakta ve sonuç olarak maksimum eşleme elde edilmiş olmaktadır.



Şekil 2.4 : Artırmalı yol kullanarak maksimum eşleme elde edilmesi.

3. OFDMA SİSTEMLERİNDE KULLANICILARA ALT-TAŞIYICI ATAMA PROBLEMİ

3.1 Problem Tanımı

OFDMA sistemlerinde alt-taşıyıcı ataması yapılırken dikkat edilmesi gereken noktalardan en önemlisi, kullanıcılar için adalet sağlanırken minimum kesinti olasılığını elde etmek amacıyla alt-taşıyıcı atamasının en uygun biçimde yapılmasıdır. Maksimum eşleme yöntemi ile alt-taşıyıcı ataması optimum biçimde sağlanmaktadır [5]. Literatürde, OFDMA sistemlerinde frekans çeşitlemesi ve frekans çoğullamasının aralarında bir ödüneşim olmak üzere aynı anda elde edilebileceği gösterilmiştir. Bu ödüneşim, çeşitleme-çoğullama ödüneşimi olarak adlandırılmıştır.

Frekans seçici yavaş sönümlemeli kanallarda çok kullanıcı bir OFDMA sisteminde alt-taşıyıcı paylaşımı problemi ele alınmaktadır. Genel bir sistem için toplam bantgenişliğinin B , bir adet baz istasyonu (base station, BS) ve de M adet kullanıcının olduğu bir senaryo düşünülebilir [5]. Genel olarak, mevcut bandgenişliği N adet alt kanala bölünmüştür ve bu alt kanalların her biri bir grup alt-taşıyıcı içermektedir. Bu senaryoda her bir alt-taşıyıcının bir uyumluluk bandgenişliği içerisinde yer aldığı varsayılmaktadır. Bu nedenle, bu senaryoda her bir alt kanal bir alt-taşıyıcı anlamına gelmektedir.

Frekans seçici yavaş sönümlemeden dolayı anlık kanal kapasitesi belli bir hedef iletim oranından (target transmission rate, R bit/s/Hz) küçük olursa alt-taşıyıcılar kesinti durumunda kalabilmektedirler. Ayrıca eğer bir kullanıcı için tüm alt-taşıyıcılar kesinti durumunda ise, o kullanıcıya atanabilecek hiçbir alt-taşıyıcı olmayacağı için o kullanıcı da kesintide olacaktır. OFDM sistemlerinde alt-taşıyıcı ataması ile ilgili temel sorun kullanıcıların, kanal sönümlemelerinden dolayı az sayıdaki kesintide olmayan alt-taşıyıcılara atanmaya çalışılmasıdır. Hangi kullanıcıya hangi alt-taşıyıcının atanacağını belirleme konusunda ya da hangi kullanıcıya

kesintide olmayan bir alt-taşıyıcıyı atama önceliği verilmesi konusunda kullanıcılar arası bir karışıklık/çatışma durumu olmaktadır. Bu sorunu çözmek adına rastgele ikili diyagram modeli çok kullanıcılı OFDMA sistemlerinde kullanılmıştır.

Bu model çerçevesinde, kullanıcılar bir düğüm grubunda ve alt-taşıyıcılar da diğer düğüm grubunda yer almaktadırlar. Kullanıcılar için kesintide olmayan alt-taşıyıcılar birbirlerine birer bağlantı ile birleştirilirler. [5]'te önerilen Random Vertex Rotation based Hopcroft-Karp (*RVRHK*) algoritması kullanıcılar için kesinti olasılığını en aza indirmeyi, diğer bir deyişle en fazla sayıda kullanıcının kesintide olmayan alt-taşıyıcılara atanmasını sağlamaktadır. Böyle bir algoritma aşağıdaki avantajları getirmektedir:

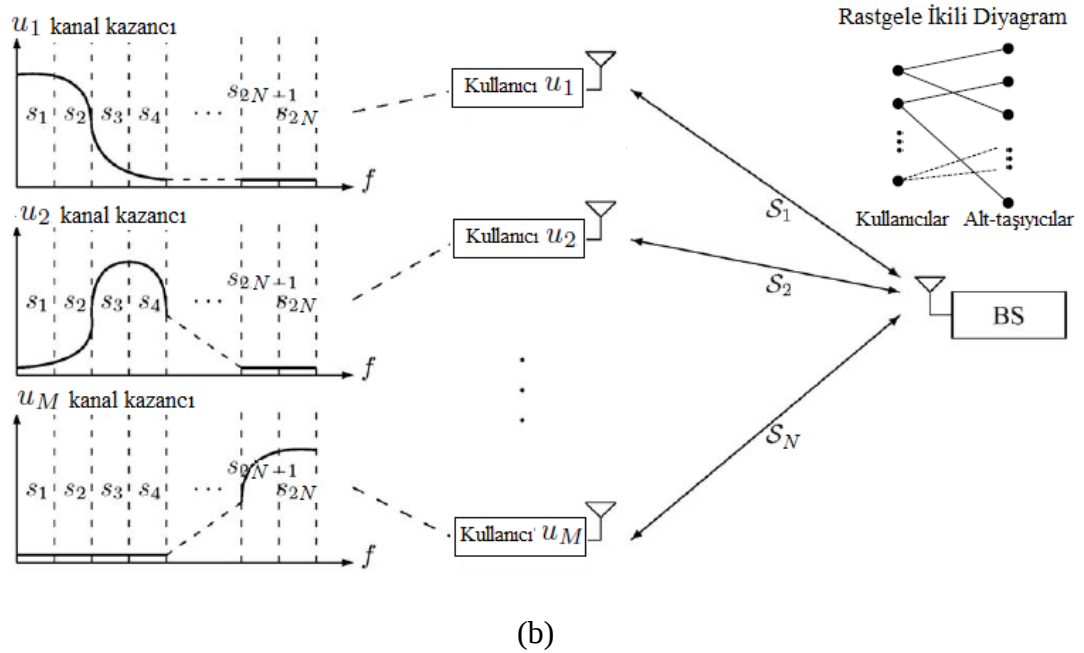
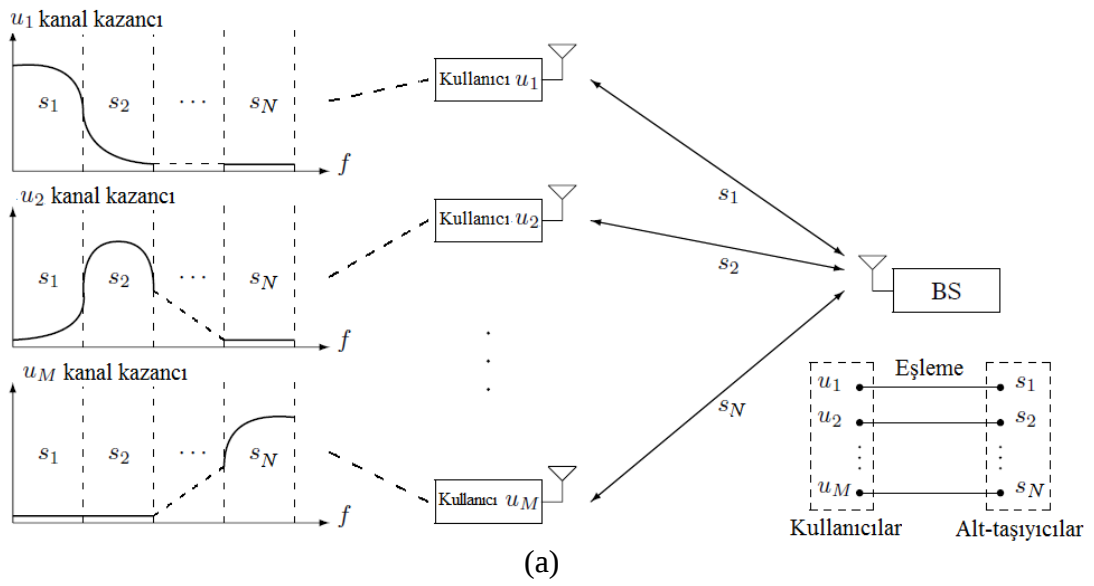
- Kullanıcılara alt-taşıyıcıları atama sırasındaki karışıklığı ortadan kaldırır; sistematik bir yol sağlar.
- Her kullanıcıya eşit sayıda alt-taşıyıcı atamayı garanti ettiğinden dolayı kullanıcılar arasında adaleti sağlar.
- Tam kanal durum bilgisi (Perfect channel state information, Perfect CSI) yerine CSI olarak 1 bit/alt-taşıyıcı/kullanıcı (1 bit/subcarrier/user) yeterlidir. Çünkü kanalın sadece kesinti durumunda olup olmadığına bakılarak kanal durum bilgisi elde edilebilmektedir.

[5]'te *RVRHK* algoritması ile elde edilen maksimum frekans çeşitleme kazancının N adet alt-taşıyıcı kullanarak sadece tek bir kullanıcıya hizmet veren noktadan noktaya (point-to-point) OFDM sistemlerindekiyle aynı olduğu, yani maksimum frekans çeşitleme kazancının bağımsız sönmüleme altındaki alt-taşıyıcıların sayısı ile aynı olduğu gösterilmiştir.

3.2 OFDMA Kanal Modeli

İlk olarak ele alınan, OFDMA sistemi modelinde çok sayıda kullanıcı ve farklı sayıda alt-taşıyıcılar ile bilgi alış verişi aypan bir adet BS olduğu varsayılmıştır. $U = \{u_1, \dots, u_M\}$ kullanıcı kümesini ve $S = \{s_1, \dots, s_N\}$ alt-taşıyıcı kümesini göstermektedir. $N \geq M$ olmak koşuluyla u_m , $m = 1, \dots, M$ olmak üzere m . kullanıcıyı ve s_n , $n = 1, \dots, N$ olmak üzere n . alt-taşıyıcıyı belirtmektedir. Her

kullanıcı için kanal olarak frekans seçici yavaş sönmülemeli kanallar dikkate alınmıştır. L uyumluluk bandgenişliği sayısı olmak üzere, bu durumda kullanıcılar ile BS arasında L adet bağımsız frekans seçici sönmülemeli kanal bulunmaktadır, ($N \geq L$). Bu modelde $L = N$ olarak seçilmiştir. Bu da uyumluluk bandgenişliği sayısının alt-taşıyıcı sayısına eşit olduğu anlamına gelmektedir. Bu durumda tüm h_m kanal kazanç vektörleri bağımsızdır ve aynı $CN(0,1)$ dairesel simetrik Gauss dağılımına sahiptirler. Alt-taşıyıcılar, kullanıcılara kanal koşullarına göre atandıklarında, frekans çeşitlemesi ve frekans çoğullaması sayesinde güvenilirlik ve verimlilik artırılabilir.



Şekil 3.1 : Frekans seçici yavaş sönmülemeli kanallarda bir adet BS ve M kullanıcılı bir OFDMA sistemi. (a) $k = 1$, (b) $k = 2$ [4],[5].

Her bir kullanıcıya atanabilecek en yüksek alt-taşıyıcı sayısı K ile gösterilsin, Bu durumda,

$$K = \left\lfloor \frac{N}{M} \right\rfloor \geq 1 \quad (3.1)$$

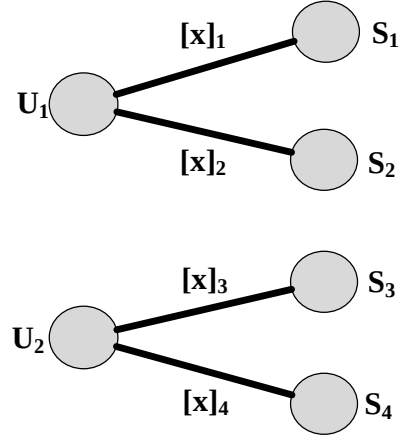
biçimindedir. BS, her kullanıcıya $k = 1, 2, \dots, K$ olmak üzere k adet alt-taşıyıcı atayabilir. Şekil 3.1'de $k = 1$ ve $k = 2$ durumları için senaryolar resmedilmiştir. Şekil 3.1(a)'da her bir kullanıcıya yalnızca $k = 1$ adet alt-taşıyıcı atanmaktadır. u_m kullanıcısı s_n alt-taşıyıcısı için iyi bir kanal koşuluna sahip iken diğer alt-taşıyıcılar için yüksek derecede bir sönümlemeye maruz kalmaktadır. Şekil 3.1(b)'de ise her bir kullanıcıya yalnızca $k = 2$ adet alt-taşıyıcı atanmaktadır. $S_i = \{s_{2i-1}, s_{2i}\}$ olmak üzere u_i kullanıcısına S_i alt-taşıyıcısı grubu atanmıştır. Yavaş sönümlemeli OFDMA kanalı üzerinden alınan işaretin, T_c ile gösterilen L_c sembole eşit zaman bloğu üzerinde aynı kanal koşullarına sahip olduğu varsayılmaktadır [5]. Bu zaman bloğu boyunca her sembol için alınan işaret frekans uzayında şu şekilde tanımlanabilmektedir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{D}\mathbf{x} + \mathbf{w}. \quad (3.2)$$

Burada w , $\mathcal{CN}(0,1)$ dağılımlı kompleks Gauss gürültüsünü göstermektedir. Her kullanıcı için iletim sembolü x ile gösterilmiştir. $[x]_n$, s_n alt-taşıyıcısının atanmış olduğu kullanıcı tarafından iletilen sembolü göstermektedir. Frekans uzayındaki kanal kazancı, bir diagonal matris olan $\mathbf{D}$ ile belirtilmektedir. n . satır ve n . sütundaki eleman ise $[\mathbf{D}]_{nn} = [\mathbf{h}_m]_n$ ile gösterilir. (3.2)'deki denklem açılırsa,

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{D}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

elde edilir. Şekil 3.2'de bu denkleme ilişkin basit bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Kullanıcı ve alt-taşıyıcılar arasındaki kanal gösterimleri

Şekildeki örnek için (3.2)'deki $\mathbf{y} = \mathbf{D}\mathbf{x} + \mathbf{w}$ ifadesi açık şekilde yazılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [D]_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [D]_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [D]_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [D]_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Bu matrislerden alınan işaret ifadeleri aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\begin{aligned} y_1 &= [D]_{11}[x]_1 + w_1 \\ y_2 &= [D]_{22}[x]_2 + w_2 \\ y_3 &= [D]_{33}[x]_3 + w_3 \\ y_4 &= [D]_{44}[x]_4 + w_4. \end{aligned} \quad (3.5)$$

$[D]_{nn} = [h_m]_n$ ifadesinden yola çıkarak aşağıdaki sonuçlar bulunabilir:

$$\begin{aligned} [D]_{nn} = [h_m]_n &\Rightarrow [D]_{11} = [h_1]_1 \\ [D]_{22} &= [h_1]_2 \\ [D]_{33} &= [h_2]_3 \\ [D]_{44} &= [h_2]_4. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Bu sonuçlarda $[h_m]_n$ ifadesi, u_m kullanıcısına s_n alt-taşıyıcısının atandığını göstermektedir. Örneğin $[h_1]_1$ ifadesinden, u_1 kullanıcısına s_1 alt-taşıyıcısının atandığı anlaşılmaktadır.

3.3 Çeşitleme-Çoğullama Ödünleşimi

[4]'te bir OFDMA sisteminde her kullanıcı için en büyük çeşitleme kazancının bağımsız alt-taşıyıcıların sayısı N 'e eşit olduğu kanıtlanmıştır. OFDMA kanalı sayesinde çeşitlemenin yanında kullanıcılara çoklu alt-taşıyıcı ataması ile daha yüksek bir iletim oranı da sağlanmaktadır. Her kullanıcıya k adet alt-taşıyıcı ataması yapılması her kullanıcının k adet bağımsız paralel kanala sahip olması anlamına gelmektedir. Bu da frekans çoğullaması demektir.

OFDMA sistemlerindeki alt-taşıyıcı ataması ile ilgili olarak kullanıcılara atanan alt-taşıyıcı sayısı arttıkça kullanıcı kesinti olasılığı da artacaktır. Çünkü bu durumda çok sayıda alt-taşıyıcı kesintide kalabilir. Kullanıcılara daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılırsa kullanıcı kesinti olasılığı her alt-taşıyıcı üzerindeki yüksek çoğullama kazancı için yüksek olacaktır. Diğer bir deyişle, bir OFDMA sisteminin belirli bir çoğullama kazancında ne kadar çeşitleme kazancı elde edebileceği çeşitleme-çoğullama ödünleşimi olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.4 Kesinti Olasılığı

Kesinti olasılığı OFDMA sistemlerinde önemli bir performans kriteridir. Yavaş sönmülemeli kanallarda, kanal kapasitesi her zaman elde edilemeyebilmektedir. Bu nedenle bunun yerine kesinti olasılığı kavramı kullanılmaktadır. u_m kullanıcısı için s_n alt-taşıyıcısının anlık kanal kapasitesi hedef iletim oranı R 'den küçük olduğu durumda, s_n alt-taşıyıcısı u_m kullanıcısı için kesinti durumunda demektir.

$B_0 = B/N$ olmak üzere u_m kullanıcısı için s_n alt-taşıyıcısına ait anlık kanal kapasitesi C_{mn} olarak gösterilir. Bu durumda, alt-taşıyıcı kesinti olasılığı aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$P_s(R) = Pr\left\{\frac{C_{mn}}{B_0} < R\right\}. \quad (3.7)$$

Bu ifade, SNR (Signal-to-noise ratio) ortalama sinyal-gürültü oranı olmak üzere, kanal kazancı D 'nin belli değerleri için kanal kapasitesi formülüne uyarlanırsa aşağıdaki ifade elde edilir [6]:

$$P_s(R) = \Pr\{\log_2(1 + |[h_m]_n|^2 SNR) < R\}. \quad (3.8)$$

Bu ifade aynı zamanda aşağıdaki ifadeye eşittir:

$$P_s(R) = \Pr\left(|[h_m]_n|^2 < \frac{2^R - 1}{SNR}\right)$$

$$P_s(R) = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{|[h_m]_n|^2} \frac{2^R - 1}{SNR}\right\}. \quad (3.9)$$

İspat:

$|[h_m]_n|^2$ terimi üstel dağılıma sahiptir. Buna göre, ortalaması $1/\lambda$ olan $p_{|[h_m]_n|^2}(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ ifadesi üstel dağılım için olasılık yoğunluk fonksiyonu olmak üzere,

$$P\left(|[h_m]_n|^2 < \frac{2^R - 1}{SNR}\right) = \lambda \int_0^{\frac{2^R - 1}{SNR}} e^{-\lambda x} dx$$

$$= -\lambda \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda x} \Big|_0^{\frac{2^R - 1}{SNR}}$$

$$= -[e^{\lambda \frac{2^R - 1}{SNR}} - 1]$$

$$= 1 - e^{\lambda \frac{2^R - 1}{SNR}} = 1 - \exp\left\{-\lambda \frac{2^R - 1}{SNR}\right\}$$

bulunur. Burada, $\sigma_{d^2}^2 = \frac{1}{\lambda} = E[|[h_m]_n|^2]$ alınarak aşağıdaki ifade elde edilebilir:

$$P\left(|[h_m]_n|^2 < \frac{2^R - 1}{SNR}\right) = 1 - \exp\left\{-\frac{2^R - 1}{SNR}\right\}. \quad (3.10)$$

4. MAKSİMUM EŞLEME ALGORİTMALARI

4.1 RVRHK Algoritması

RVRHK (Random Vertex Rotation Based Hopcroft-Karp) algoritması [6] alt-taşıyıcı paylaşımı için oldukça etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu algoritmayı kullanarak minimum kesinti olasılığı kriteri ve adalet kriteri sağlanmaktadır. Verilen bir $G(V_1 \cup V_2, E)$ diyagramından yola çıkarak maksimum eşlemesi $\mathcal{M}$ olan bir eşleme Hopcroft-Karp algoritması kullanarak bulunabilmektedir. Hopcroft-Karp algoritması kullanılarak maksimum eşleme yapmayı sağlayan RVRHK algoritması Algoritma 1’de gösterilmektedir.

Algoritma 1: RVRHK Algoritması [5]

- 1- U kümesindeki düğümleri eşit olasılık ile rastgele döndür.
- 2- $M \leftarrow \emptyset$
- 3- **repeat**
- 4- BFS uygulayarak en kısa artırımlı yolu bul.
- 5- DFS uygulayarak varsa en kısa artırımlı yolların maximal kümesini bul.
- 6- $M \leftarrow M \oplus p$ işlemini uygula.
- 7- Artırımlı yol bulamayana kadar algoritmaya devam et.
- 8- $\mathcal{M}$ eşlemesini çıkış olarak al ve algoritmayı durdur.

Bu algoritmayı kullanmadaki temel amaç maksimum düzeyde bir eşleme sağlayarak sistemdeki tüm kullanıcılar için eşit kesinti olasılığı elde etmektir. Bu nedenle bu noktada adalet kriteri ön plana çıkmaktadır. Adalet kriterini sağlamak amacıyla Algoritma 1’deki 1. adımda, kullanıcılar arasında bir döndürme (rotation) işlemi yapılmaktadır. Döndürme işleminde diyagram üzerinde çizili olan kullanıcıların sıraları rastgele değiştirilmektedir. Aslında bu işlem bir kullanıcıya kesintide

olmayan bir alt-taşıyıcıyı atama önceliğini belirtmektedir. Çünkü eğer bu işlem yapılmazsa diyagramdaki son kullanıcının kesintide olmayan bir alt-taşıyıcıya sahip olma önceliği en az olacaktır, bu da bu kullanıcının daha yüksek bir kesinti olasılığına sahip olmasına neden olacaktır. Döndürme işlemini uygulayarak her kullanıcının kesintide olmayan bir alt-taşıyıcıya atanma önceliğinin aynı olması, aynı kesinti olasılığına ve de aynı çeşitleme kazancına sahip olması sağlanmaktadır.

4.1.1 Kesinti formülasyonu

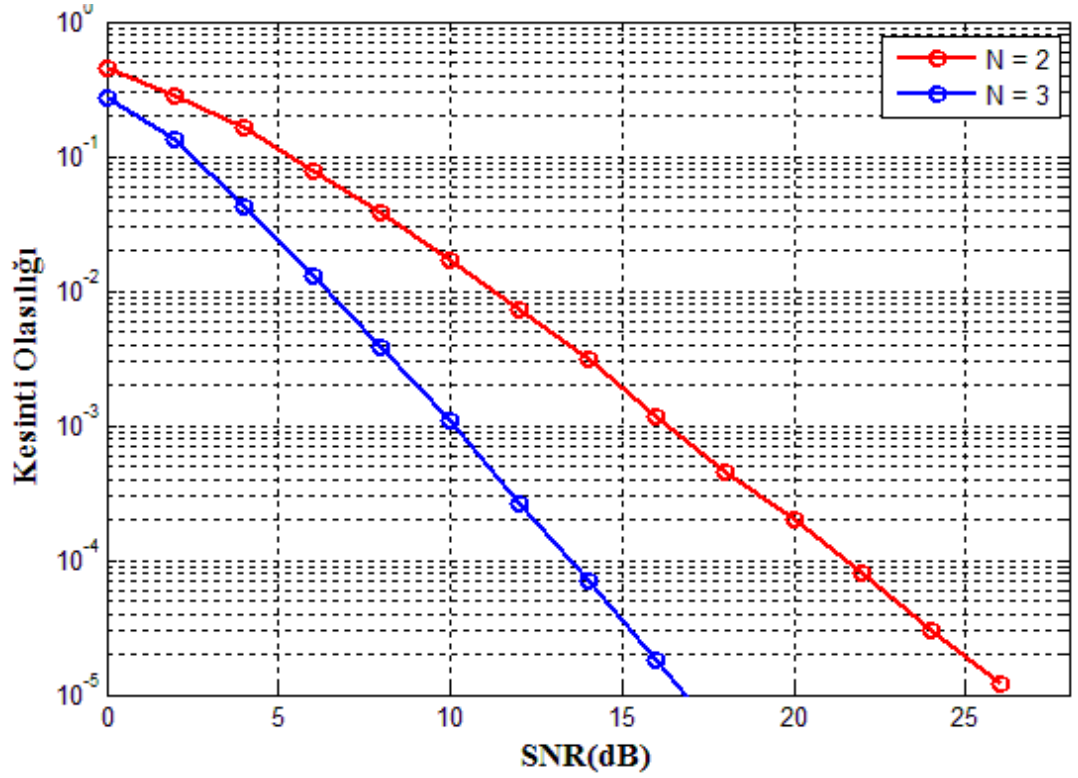
$\xi_m(k) = 1$ ifadesi u_m kullanıcısının $\mathcal{M}$ maksimum eşlemesinden sonra kesintide olma durumunu, $\xi_m(k) = 0$ ise u_m kullanıcısının kesintide olmama durumunu gösterebilir. Kesintide kalan kullanıcıların sayısı $\Xi = \sum_{m=1}^M \xi_m$ ile gösterilsin [5]. $\mathbb{E}$, beklenen değeri belirtmek üzere, aşağıdaki denklem kesinti olasılığını vermektedir:

$$P_u = \frac{\mathbb{E}(\Xi)}{M}. \quad (4.1)$$

Ξ teriminin dağılımından yola çıkarak olasılık hesabı yapılmaktadır. Farklı örnekler sonucunda elde edilen kesintide kalan kullanıcı sayısı hesaplandıktan sonra bunların ortalaması alınarak kullanıcı kesinti olasılığı elde edilmektedir.

4.1.2 Benzetim sonuçları

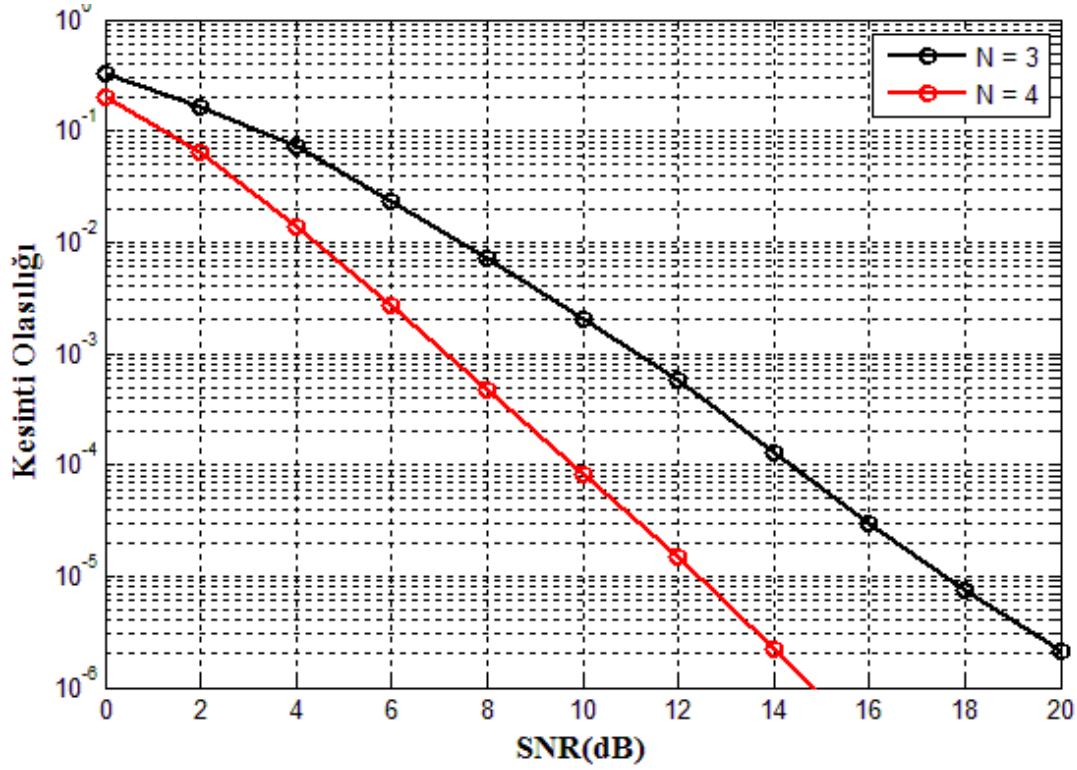
Yukarıda belirtilen yapının sağladığı performans MATLAB programı kullanılarak bilgisayar benzetimleri ile test edilmiştir. Benzetim çalışmalarında sönümlenmeli kanal parametrelerinin üretiminin ardından belli bir eşik değere göre kullanıcı ve alt-taşıyıcı düğümleri arasında bağlantı olup olmadığı belirlenmektedir. Bu eşik değer için $||[h_m]_n|^2 < \frac{2^R-1}{SNR}$ kriteri kullanılmaktadır. Burada bandverimliliği $R = 1$ alınmaktadır. Eğer karesel kanal katsayısı bu eşik değerden küçük ise iki düğüm arasında bağlantı yok demektir.



Şekil 4.1 : $M = 2$ ve $N = 2,3$ için maksimum eşleme sonucunda elde edilen kullanıcı kesinti olasılıkları.

Şekil 4.1’de $M = 2$ kullanıcı ve $N = 2$ ya da $N = 3$ alt-taşıyıcılı OFDMA sistemlerinde kullanıcı kesinti olasılığı P_u ’ya ait benzetim sonuçları gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, alt-taşıyıcı sayısının 1 artması kesinti olasılığı üzerinde büyük bir etki yaratmaktadır. Çeşitleme derecesinin de arttığı görülmektedir. Örneğin 10^{-3} kesinti olasılığı değeri için iki eğri arasında yaklaşık olarak 12 dB kadar fark bulunmaktadır.

Şekil 4.2’de $M = 3$ kullanıcı ve $N = 3$ veya $N = 4$ alt-taşıyıcılı OFDMA sistemde kullanıcı kesinti olasılığı P_u ’ya ait sonuçlar gösterilmektedir. Burada da olduğu gibi alt-taşıyıcı sayısı arttıkça çeşitleme derecesi de artmaktadır. Ayrıca beklenildiği gibi kesinti olasılığı da düşmektedir.



Şekil 4.2 : $M=3$ ve $N=3,4$ için maksimum eşleme sonucunda elde edilen kullanıcı kesinti olasılıkları.

4.2 $\mathcal{H}$ -Eşleme Yaklaşımı

[26]'da önerilen $\mathcal{H}$ -eşleme yaklaşımı, daha önce bahsedilen maksimum eşleme yönteminden biraz daha farklı bir yapıdadır. Bu yöntemde $\mathcal{H}$, sabit bir alt-diyagramdır (sub-graph). $\mathcal{H}$ -eşleme yöntemi, sabit $\mathcal{H}$ alt-diyagramının birbirinden bağımsız kopyalarının en büyük toplamını temsil etmektedir. Sadece alt-taşıyıcı ataması yapılarak en uygun (optimal) çeşitleme-çoğullama ödünleşimini; yani belirli bir çoğullama kazancında en uygun performansı sağlamaktadır.

$\mathcal{H}$ alt-diyagramı için G 'nin maksimum $\mathcal{H}$ -eşlemesi $\mathcal{M}_{\mathcal{H}}$ ile gösterilir. $\mathcal{M}_{\mathcal{H}}$, G diyagramı içindeki $\mathcal{H}$ 'in düğümden bağımsız (node-disjoint) kopyalarının en büyük toplamıdır. Alt-taşıyıcı ataması açısından $\mathcal{H}$, alternatif olarak $\mathcal{K}_{1,k}$ şeklinde de gösterilebilmektedir. Bu nedenle $\mathcal{M}_{\mathcal{H}}$, $\mathcal{M}_{\mathcal{K}_{1,k}}$ olarak da ifade edilebilir. $\mathcal{K}$ 'nin indisi olan “1, k ” bir adet kullanıcının k adet alt-taşıyıcıya eşleneceğini göstermektedir. Burada her eşlemede 1 kullanıcı ve k adet alt-taşıyıcının olduğu bir alt-diyagram oluşmaktadır; yani oluşan her bir diyagram bir $\mathcal{H}$ alt-diyagramı olarak adlandırılmaktadır. $\mathcal{H}$ -eşleme yönteminde kesinti olasılığı hesabı için kesintide

kalan kullanıcılar $\Xi(k) = \sum_{m=1}^M \xi_m(k)$, $k = 1, \dots, K$ formülü kullanılarak hesaplanmaktadır. $K = \left\lfloor \frac{N}{M} \right\rfloor$ olarak gösterilmektedir ve alt-taşıyıcı ataması sonrasında her bir kullanıcının sahip olacağı alt-taşıyıcı sayısı olarak tanımlanmaktadır. Kullanıcı kesinti olasılığı ise şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$p_u = \min_{k=1, \dots, K} \frac{\mathbb{E}(\Xi(k))}{M}. \quad (4.2)$$

Buradaki minimum ifadesi örneğin $K = 2$ için $k = 1$ ve $k = 2$ durumundaki eşleşmelerin sonuçlarının minimumu anlamındadır. Bu yaklaşım için ele alınan OFDMA kanal modeli daha önce bahsedilen kanal modelinden biraz farklılık göstermektedir. Burada ele alınan kanal modelinde sistemde L adet uyumluluk bandgenişliği olduğu varsayılmıştır. Her uyumluluk bandgenişliği $N_c = \frac{N}{L}$ alt-taşıyıcı içermektedir. Ayrıca bu modelde her zaman $M > L$ seçilmektedir [6]. OFDM sistemlerinde farklı uyumluluk bandgenişliği içerisindeki alt-taşıyıcılar arasındaki korelasyon derecesi çok az iken aynı uyumluluk bandgenişliği içindeki alt-taşıyıcıların arasındaki korelasyon derecesi yüksektir [27]. Bundan dolayı aynı uyumluluk bandgenişliği içerisinde yer alan alt-taşıyıcıların kanal kazançları aynı alınabilmektedir. Farklı uyumluluk bandgenişliğindeki alt-taşıyıcıların ise kanal kazançları birbirinden bağımsızdır.

Maksimum eşleme için verilen alt-taşıyıcı kesinti olasılığı ifadesi buradaki model için şu şekilde yazılabilmektedir [6]:

$$p_s = \Pr \left\{ \frac{1}{N_c} \log_2(1 + |[h_m]_n|^2 \text{SNR}) < R_s = \frac{R}{k} \right\}. \quad (4.3)$$

Gösterilebilir ki, Rayleigh kanal durumunda aynı olasılık ,

$$p_s = 1 - \exp \left\{ - \frac{2^{\frac{N_c R}{k}} - 1}{\text{SNR}} \right\}. \quad (4.4)$$

biçiminde yazılabilir. Bu durumda eğer aşağıdaki denklem sağlanmazsa s_n alt-taşıyıcısı bir u_m kullanıcısı için kesintide demektir:

$$|[h_m]_n|^2 < \frac{2^{\frac{N_c R}{k}} - 1}{SNR}. \quad (4.5)$$

R_S , her bir alt-taşıyıcı üzerindeki hedef iletim hızıdır ve $R_S = \frac{R}{k}$ olarak gösterilmektedir. Bu gösterime göre, OFDMA sistemlerindeki bir kullanıcının kesinti olasılığı, bir kullanıcının k adet kesintide olmayan alt-taşıyıcıyı elde edememe olasılığına denk demektir.

OFDMA sistemlerinde alt-taşıyıcı atama konusunda kullanıcılar arası bir çatışma olmasına rağmen bu yöntem ile elde edilen kesinti olasılığı eğrisi tek kullanıcılı noktadan-noktaya (point-to-point) OFDM sistemlerinde olduğu gibi aynı eğime sahiptir. Bu da $\mathcal{K}_{1,k}$ eşlemesinin OFDMA sistemlerindeki kullanıcı çatışmalarını büyük ölçüde giderdiği anlamına gelmektedir. Bu eşleme yapılırken ayrıntıları izleyen alt bölümde verilen R^2EHK (Random Rotation and Expansion based Hopcroft-Karp) algoritması kullanılmaktadır [6].

4.2.1 R^2EHK Alt-taşıyıcı atama algoritması

$\mathcal{H}$ -eşleme tekniğini temel alarak geliştirilmiş olan R^2EHK algoritması sayesinde bir kullanıcıya birden fazla alt-taşıyıcı ataması yapılabilmektedir. Aynı zamanda bu algoritma optimum kesinti performansını sağlamaktadır. Aşağıdaki Algoritma 2’de, R^2EHK algoritmasına ilişkin izlenecek olan adımlar gösterilmektedir.

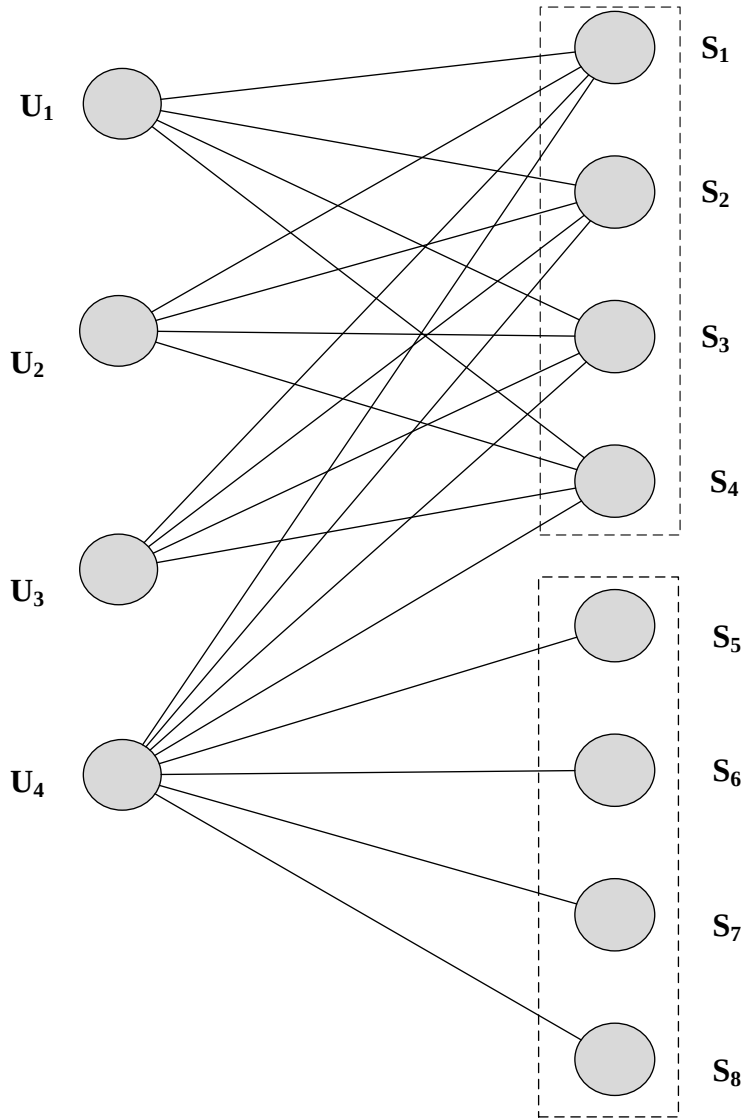
Algoritma 2: R^2EHK Algoritması

- 1- $\deg(u) < K$ olan her $u \in U$ ve $\deg(s) = 0$ olan her $s \in S$ i sil, ve ayrıca onlara bağlı olan bağlantıları da kaldır.
- 2- U kümesindeki düğümleri eşit olasılık ile rastgele döndür.
- 3- U kümesindeki her u düğümünü K düğüme çoğulla.
- 4- $M \leftarrow \emptyset$
- 5- **repeat**
- 6- BFS uygulayarak en kısa artırımlı yolu bul.
- 7- DFS uygulayarak varsa en kısa artırımlı yolların maximal kümesini bul.
- 8- $M \leftarrow M \oplus P$ işlemini uygula.
- 9- Artırımlı yol bulamayana kadar algoritmaya devam et.
- 10- 3. adımdaki düğüm genişletilmesi işleminin tersini uygulayarak kullanıcıları eski haline getir.
- 11- $\mathcal{M}_{K_{1,K}}$ eşlemesini çıkış olarak al ve algoritmayı durdur.

Bu algoritma için 1. adımda, kanal koşullarına göre elde edilen diyagramda eğer derecesi K 'dan küçük olan kullanıcı düğümü varsa veya derecesi sıfır olan bir alt-taşıyıcı düğümü varsa bu düğümler diyagramdan işlem karmaşıklığı yaratmamaları için silinmektedirler. 2. adımda rastgele döndürme işlemi ile kullanıcılar arasındaki adalet garantilenmiştir. Bu işlemde, diyagramın sol tarafında bulunan kullanıcı düğümleri rastgele yer değiştirirler ve atama önceliği farklı kullanıcılara verilmiş olur. Her iterasyonda bu işlem gerçekleştiğinden kullanıcılar arasındaki adalet sağlanmış olmaktadır. 3. adımda ise kullanıcılara K adet alt-taşıyıcı ataması yapılabilmesi için her düğüm K adet düğüme çoğullanarak yeni bir diyagram elde edilmektedir. 4. adımdan 9. adıma kadar olan kısımda ise Hopcroft-Karp algoritması ile maksimum eşleme elde edilmektedir.

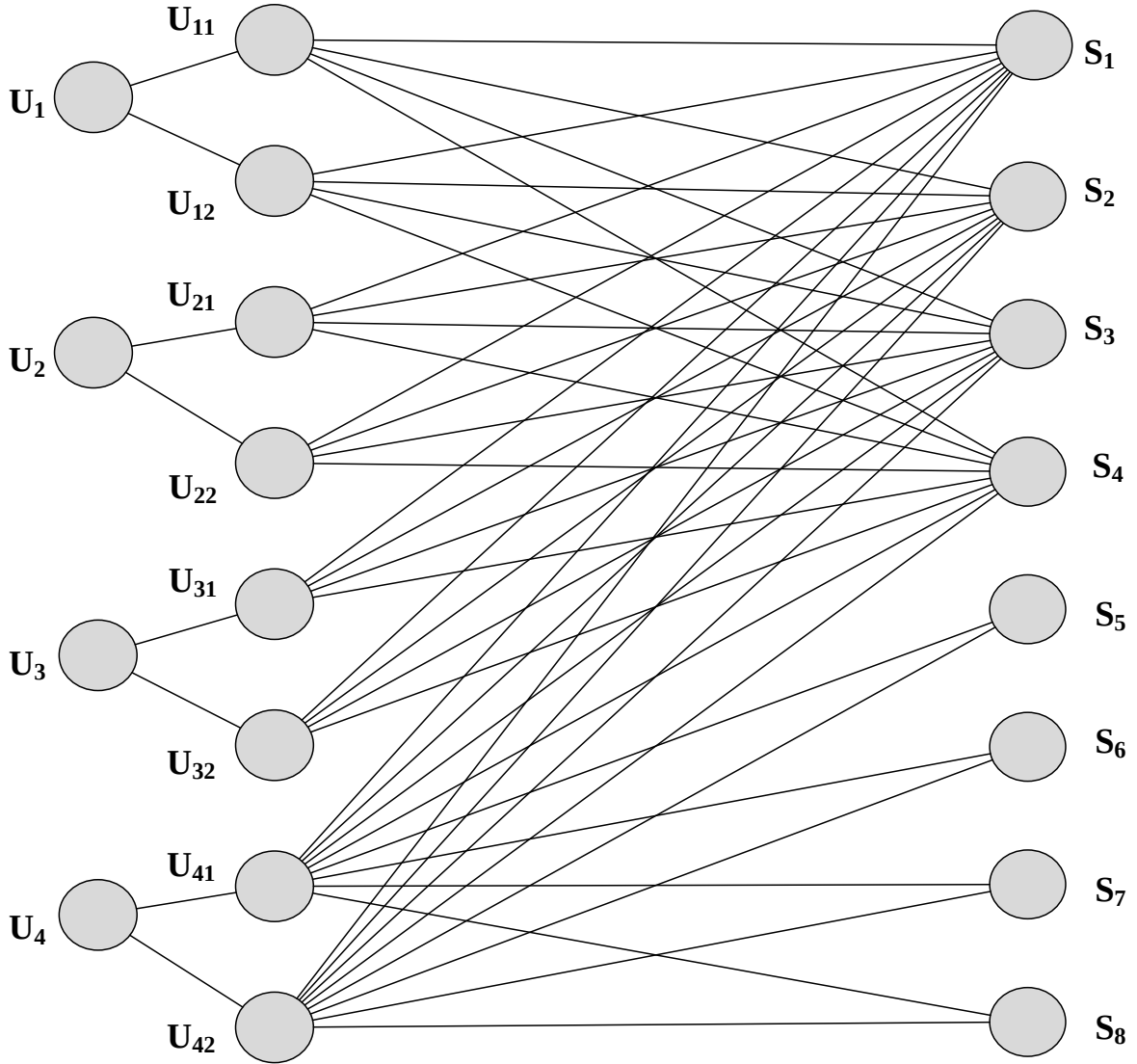
4.2.2 R^2EHK algoritmasının adımları

Bir önceki bölümde uygulama adımları anlatılan R^2EHK algoritmasını açıklayabilmek amacıyla [6]'da verilen diyagram örneği kullanılsın. $U = \{u_1, \dots, u_M\}$, kullanıcı düğümü kümesini ve $S = \{s_1, \dots, s_N\}$, alt-taşıyıcı düğümü kümesini göstermektedir. $M = 4, N = 8, L = 2$ ve $K = \left\lfloor \frac{N}{M} \right\rfloor = 2$ olarak alınmaktadır. Yukarıdaki parametrelere sahip örnek rastgele ikili diyagram $G(V_1 \cup V_2, E)$, Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Kesikli çizgili bölgeler uyumluluk bandverimliliklerini göstermektedir.



Şekil 4.3 : Örnek rastgele ikili diyagram [6].

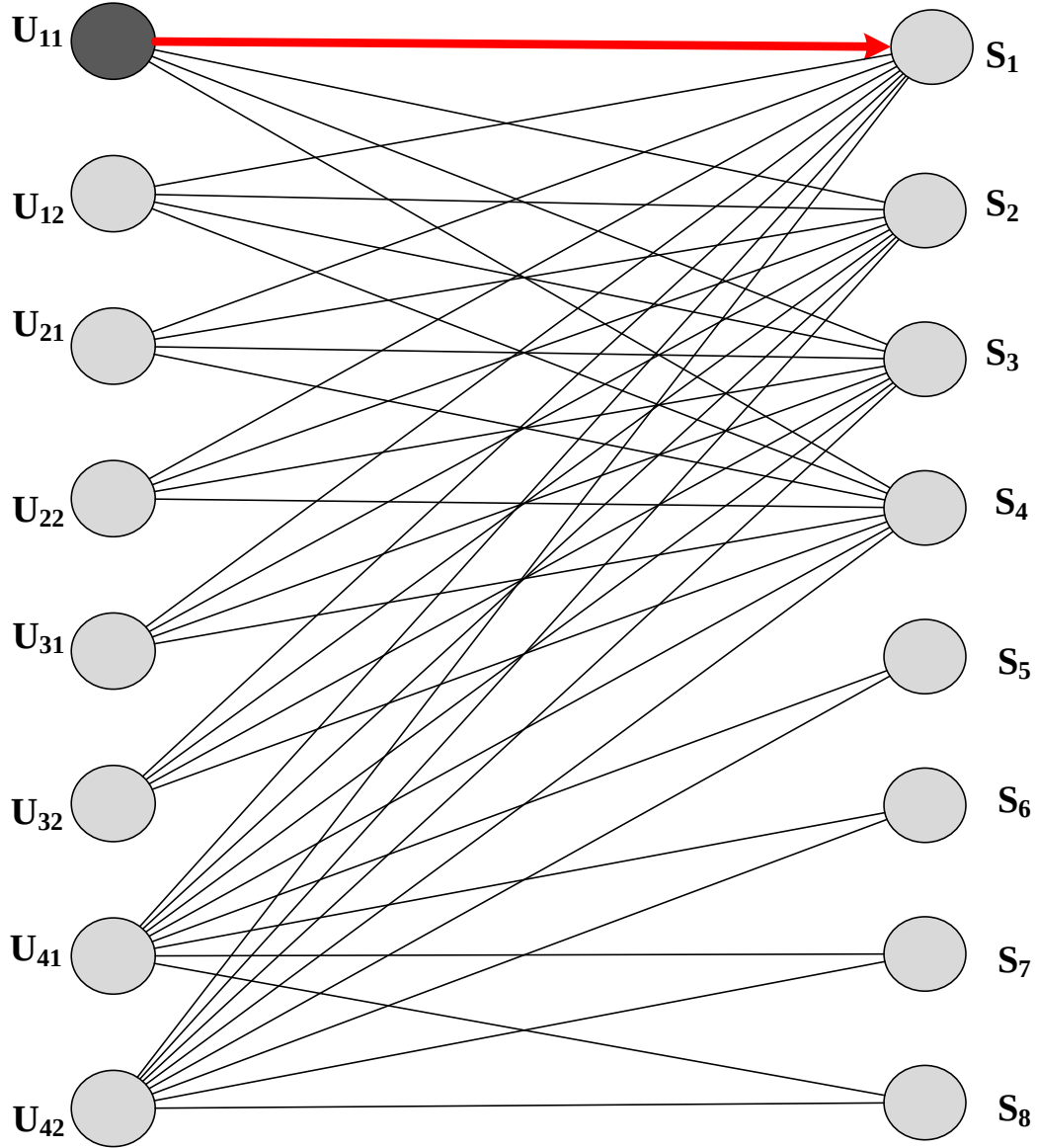
Algoritmanın 1. adımında, tüm kullanıcı düğümleri için $\deg(u) > K$ olduğundan hiçbir kullanıcı diyagramdan kaldırılmaz. Pratik uygulamada, 2. adımdaki döndürme işlemi yapılacaktır; fakat burada tek bir örnek üzerinden döndürme işleminin yapıldığı varsayılarak devam edilebilir. 3. adım için, her kullanıcı düğümü Şekil 4.4'te görüldüğü gibi K adet düğüme çoğullanmaktadır. Yeni oluşan çoğullanmış kullanıcı kümesi $\tilde{U}$ ile gösterilsin.



Şekil 4.4 : İlk 3 adım sonrası oluşan yeni rastgele ikili diyagram.

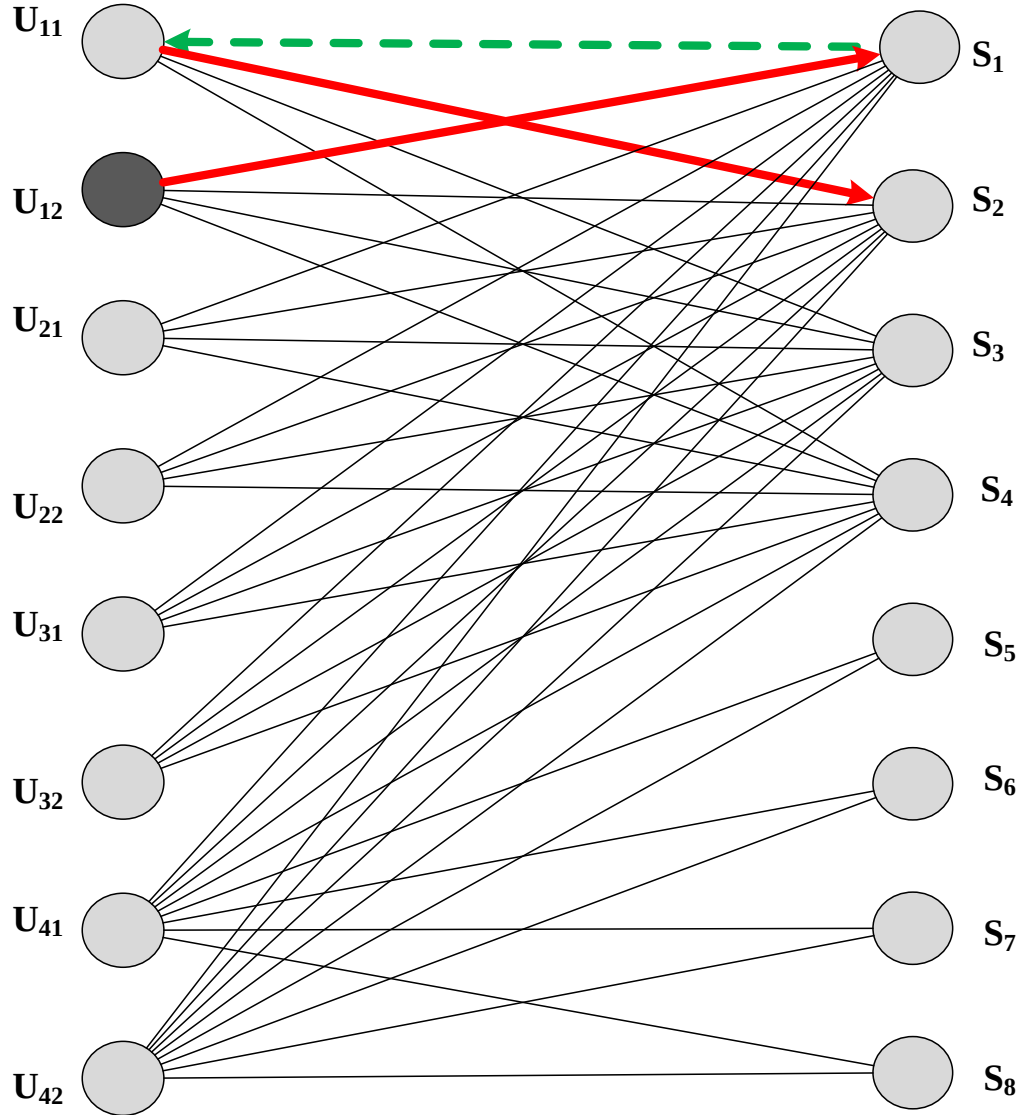
4. adımda belirtildiği gibi başlangıçta $\mathcal{M} \leftarrow \emptyset$ olacaktır; yani diyagram üzerinde herhangi bir eşleme olmayacaktır. Bundan dolayı başlangıçta bütün düğümler $\mathcal{M}$ -

unsaturated (serbest) durumundadır. $\tilde{U}$ kümesi içindeki ilk serbest düğümden başlayarak S kümesi içindeki ilk serbest düğüme kadar gidilir ve burada durulur. Böylece, Şekil 4.5'te kalın kırmızı çizgi ile gösterilen ilk artırılmış yol ve aynı zamanda da ilk eşleme elde edilmiş olur. Bu ilk eşleme $(1 \rightarrow 1)$ şeklinde gösterilsin. Koyu renk ile gösterilen düğüm, yeni bir artırılmış-yol bulmak için o aşamada hangi kullanıcıdan başlanıldığını göstermektedir.



Şekil 4.5 : 1. eşleme, $(1 \rightarrow 1)$.

BFS işlemine diyagramda $\tilde{U}$ kümesindeki 2. serbest düğümden devam edilir. 2. düğümden, bir önceki adımda en son hangi S düğümünde kalındıysa o S düğümüne giden yoldan geçilir ve bir önceki artırımı yol üzerinden geri gidilir. Bu işlem S kümesi içinde yeni bir serbest düğüm bulana kadar devam eder. İzlenecek yol, Şekil 4.6'da gösterildiği gibi $(2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2)$ biçiminde olmalıdır. Bu yol en kısa $\mathcal{M}$ -artırımlı yolu olmaktadır. Son işlem olarak, yeni bulunan $(2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2)$ yolu ile bir önceki $(1 \rightarrow 1)$ yolunun simetrik farkını alarak, yeni eşleme bulunmuş olmaktadır. Bunun için basit bir mantıkla yeni bulunan yoldan bir önceki yol çıkartılabilir; yani yeni eşleme $(2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2)$ şeklindedir. Böylelikle eşleme sayısı da artmış olmaktadır.



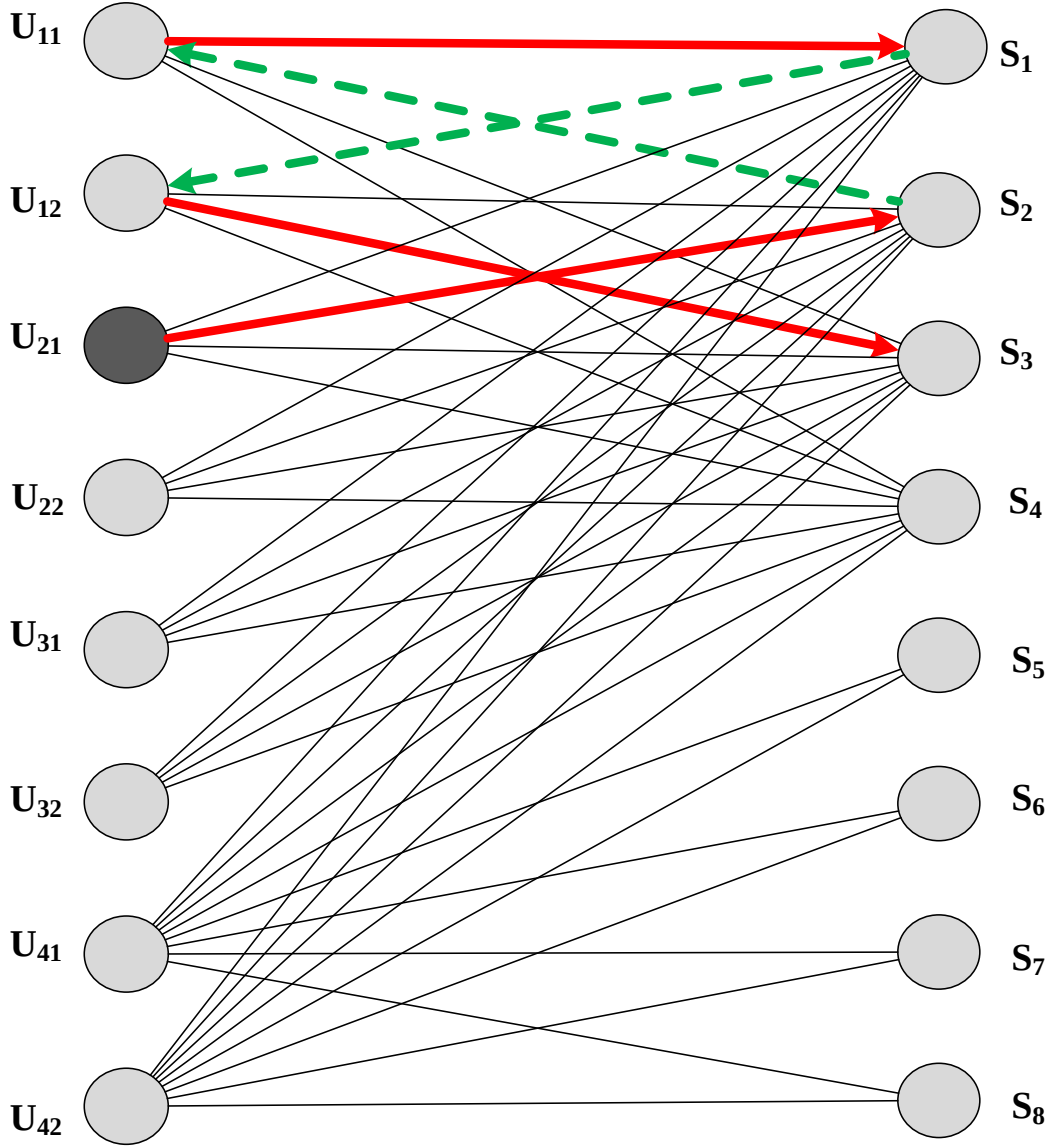
Şekil 4.6 : 2. eşleme, $(2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2)$.

Şu an elimizde $(2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2)$ eşlemesi bulunmaktadır. Yeni bir artırımly yol bulmak için $\tilde{U}$ kümesindeki 3. serbest düğümünden başlanmalıdır. Bir önceki adımlarda olduğu gibi artırımly yol için izlenecek yol şu şekilde olmaktadır:

$$(3 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 3).$$

Şekil 4.7’de koyu kırmızı ile gösterilen bağlantılar S kümesinden $\rightarrow \tilde{U}$ kümesine bağlantı olduğu anlamındadır. Simetrik fark işleminin uygulanması sonucu şekilde koyu kırmızı renk ile gösterildiği gibi yeni eşleme şu biçimde olmaktadır:

$$(3 \rightarrow 2) - (1 \rightarrow 1) - (2 \rightarrow 3).$$



Şekil 4.7 : 3. eşleme, $(3 \rightarrow 2) - (1 \rightarrow 1) - (2 \rightarrow 3)$.

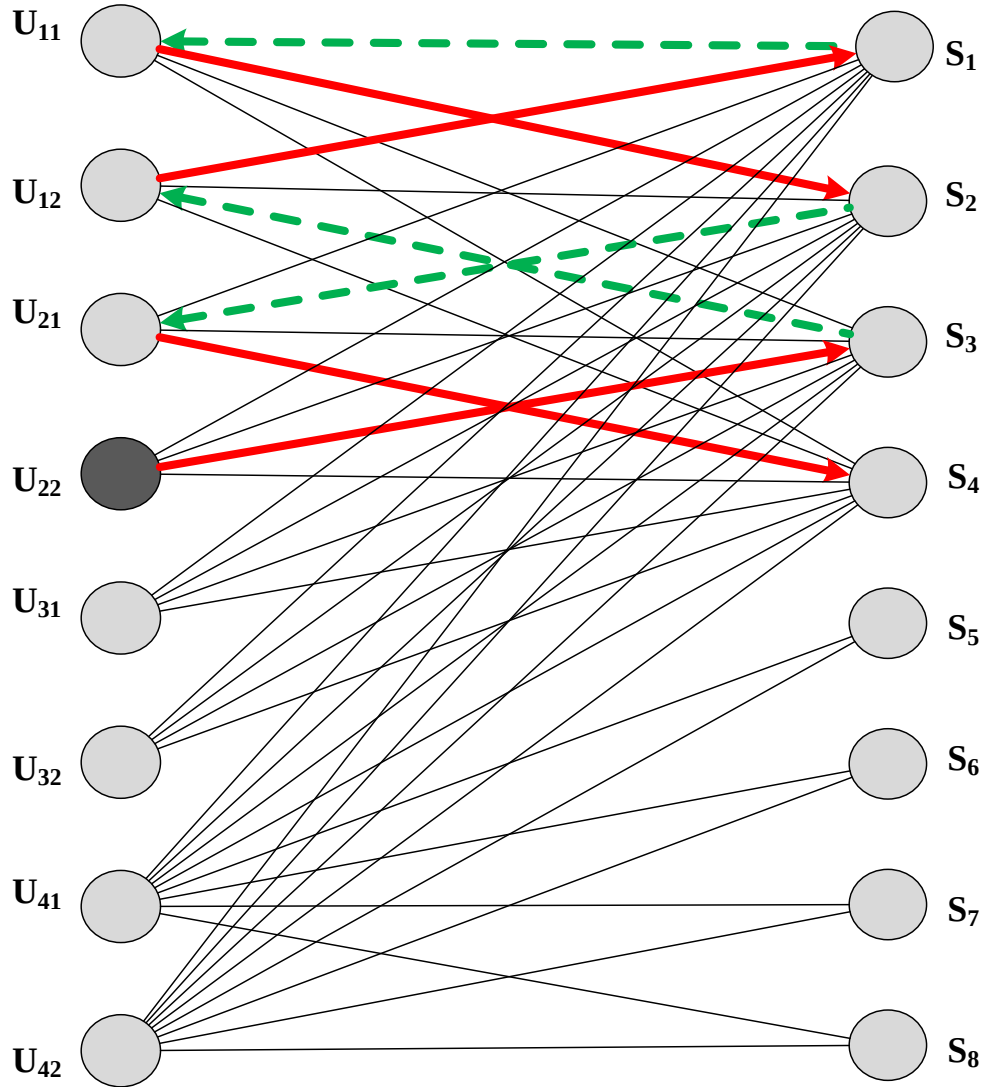
Elimizde bulunan mevcut eşleme şu an $(3 \rightarrow 2) - (1 \rightarrow 1) - (2 \rightarrow 3)$ şeklindedir. $\tilde{U}$ kümesindeki 4. serbest düğümden devam edilerek yeni bir artırımı yol arandığında şu şekilde bir yol bulunmaktadır:

$$(4 \rightarrow 3) - (3 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 3) - (3 \rightarrow 4).$$

Simetrik fark alındıktan sonra yeni eşleme, Şekil 4.8’de gösterildiği gibi,

$$(4 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4)$$

biçiminde bulunur.



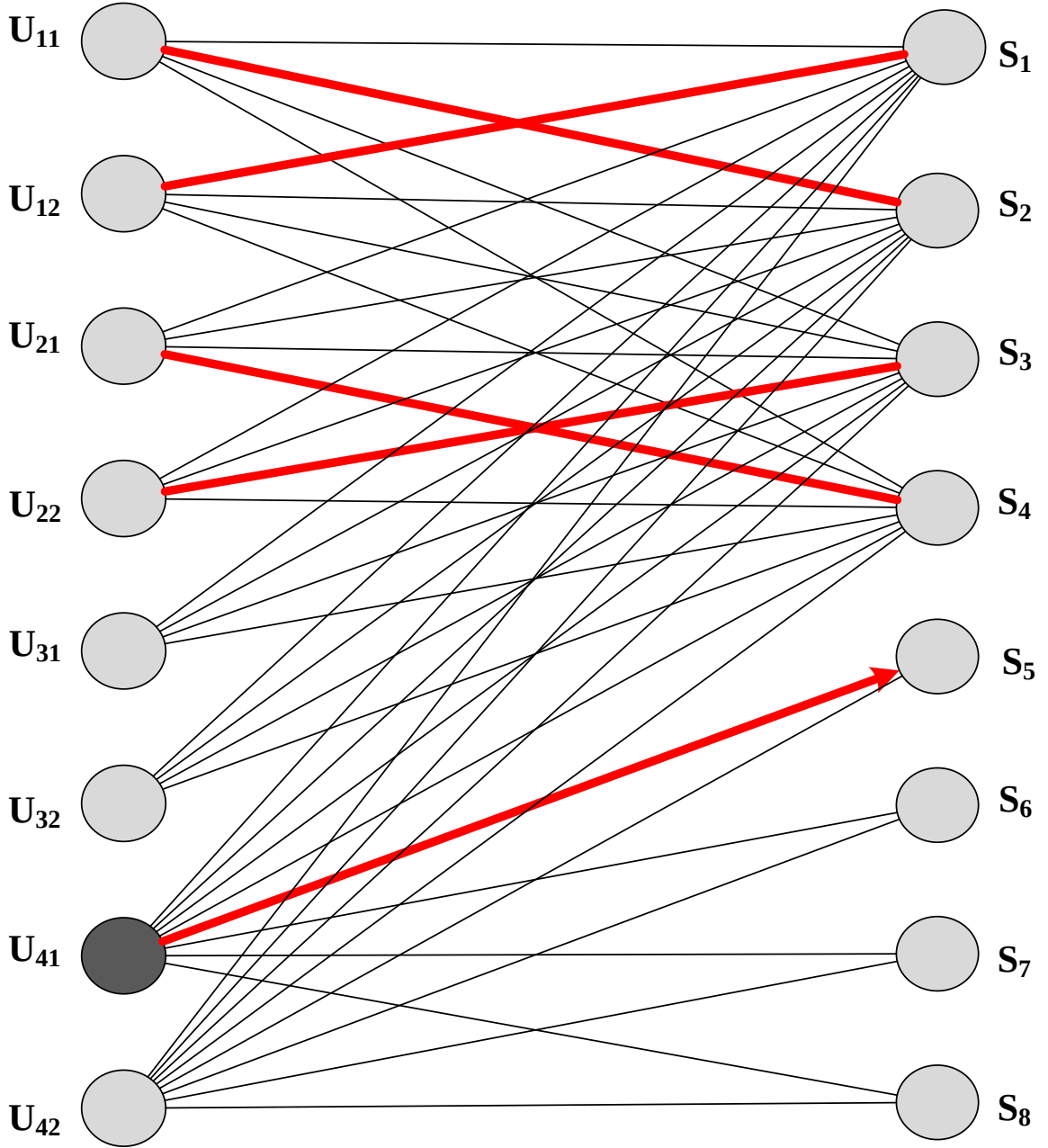
Şekil 4.8 : 4. eşleme, $(4 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4)$.

Mevcut eşleme $(4 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4)$ şeklindedir. $\tilde{U}$ kümesindeki 5. düğümden algoritmaya devam edilmektedir. 5. düğümden, en son kalınan S kümesindeki 4. düğüme bir bağlantı olmadığı için buradan, daha önceki adımlarda izlenen yolların üzerinden geri gidilerek bir artırımlı yol bulunamamaktadır. Dikkat edilirse 5. kullanıcı S kümesindeki sadece ilk üç düğüm ile bağlanmıştır. 5. düğümünden artırımlı yol bulmak için ilk 4. düğümden birinin mutlaka S kümesindeki son 4 düğümden en az biriyle eşleşmesi gerekmektedir. Çünkü S kümesindeki ilk 4 düğüm daha önce ziyaret edildiğinden algoritma bu düğümlerde sonlanamaz. Algoritmanın sonlanabilmesi için S kümesinde serbest bir düğüm bulunması gerekmektedir. Aynı durum $\tilde{U}$ kümesindeki 6. düğüm için de geçerli olduğu için bu düğümlerden bir eşleme bulunamamaktadır.

Algoritmaya $\tilde{U}$ kümesinin 7. düğümü ile devam edilir. Bu düğümden başlayarak ve daha önceki adımlarda bulunan yollar üzerinden geçerek bir artırımlı yol bulunamamaktadır. 5. ve 6. düğümde olduğu gibi $\tilde{U}$ kümesinin ilk 4 düğümünden S kümesine eşlenecek serbest bir düğüm yoktur. Fakat $\tilde{U}$ kümesinin 7. düğümü S kümesinin tüm düğümleriyle bağlanmıştır. Bu nedenle, S kümesinin ilk 4 düğümü ziyaret edildiği için 7. kullanıcı düğümünden, sıradaki S kümesi içindeki serbest durumdaki 5. düğüme bir artırımlı yol oluşturulur ve böylece yeni eşleme $(5 \rightarrow 7)$ olur. Elde edilen bu eşleme önceki eşlemeye eklenirse,

$$(4 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4) - (5 \rightarrow 7)$$

elde edilir. Şekil 4.9 bu eşlemeyi göstermektedir.



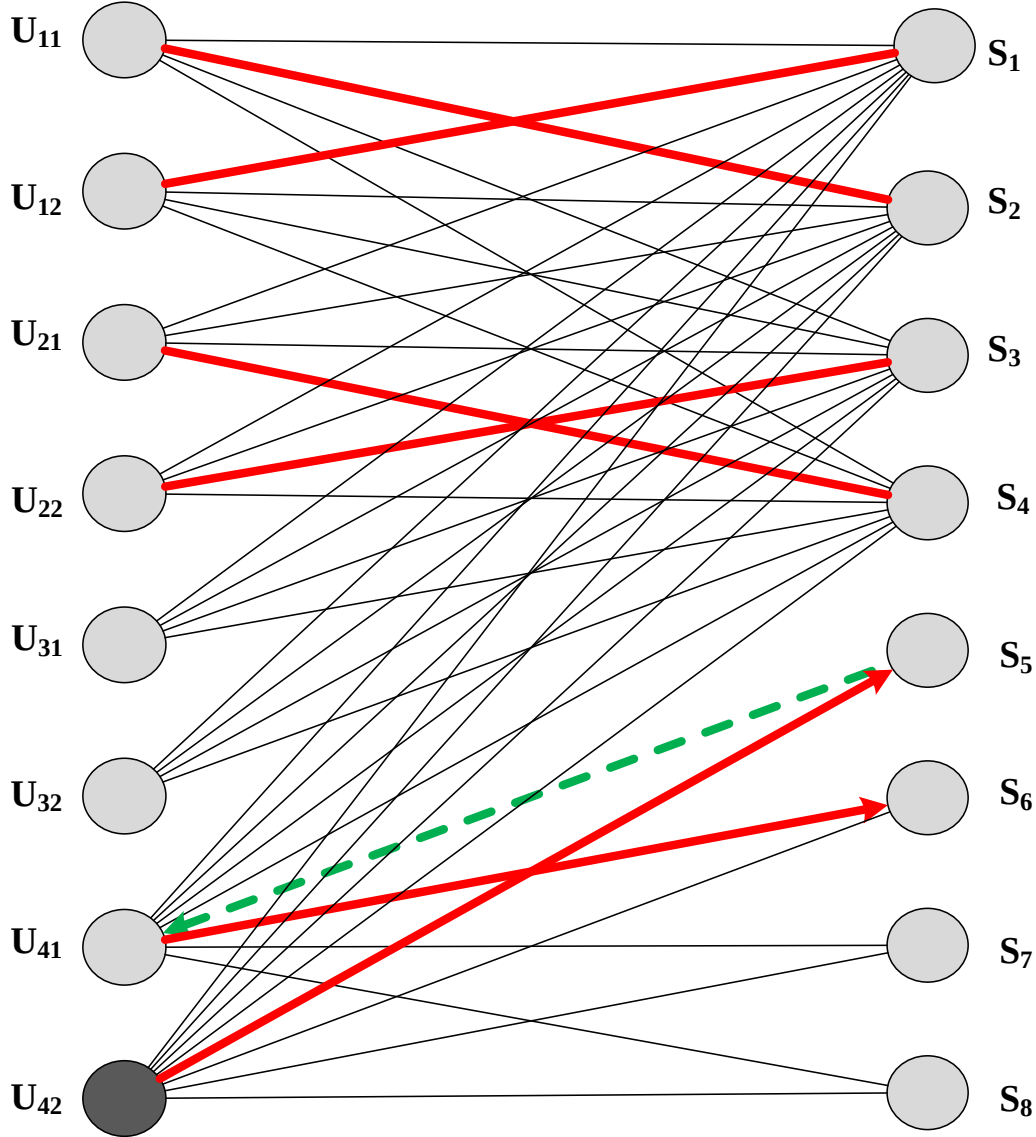
Şekil 4.9 : 5.eşleme, $(4 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4) - (5 \rightarrow 7)$.

Son durumdaki mevcut eşleme $(4 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4) - (5 \rightarrow 7)$ şeklindedir. $\tilde{U}$ kümesinin son düğümü olan 8. düğüm ile algoritmaya devam edilir. Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, bu düğümden başlayarak en kısa artırımlı yolu bulmak için bir önceki adımda izlenilen yol üzerinden geri gidilerek şu şekilde bir artırımlı yol bulunmaktadır:

$$(8 \rightarrow 5) - (5 \rightarrow 7) - (7 \rightarrow 6).$$

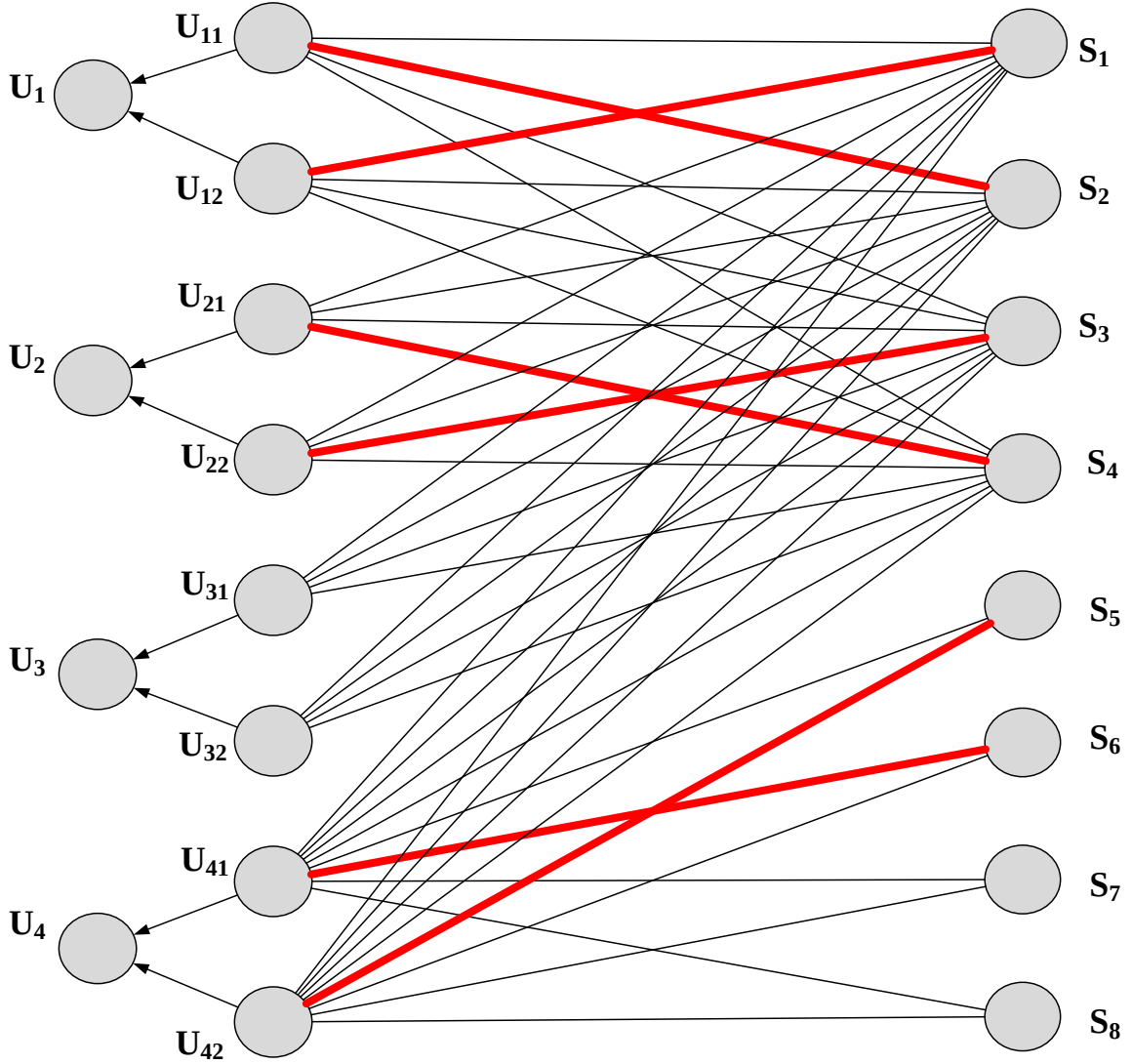
Kırmızı renk ile gösterilen $(5 \rightarrow 7)$ eşlemesi ile yeni artırılmış yol arasında simetrik fark işlemi sonrası $(8 \rightarrow 5) - (7 \rightarrow 6)$ eşlemesi bulunmaktadır. Bu eşleme, son durumdaki mevcut eşlemeye eklenirse sistemin maksimum eşlemesi aşağıdaki gibi elde edilmiş olmaktadır:

$$(4 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4) - (8 \rightarrow 5) - (7 \rightarrow 6).$$



Şekil 4.10 : 6. eşleme, $(4 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4) - (8 \rightarrow 5) - (7 \rightarrow 6)$.

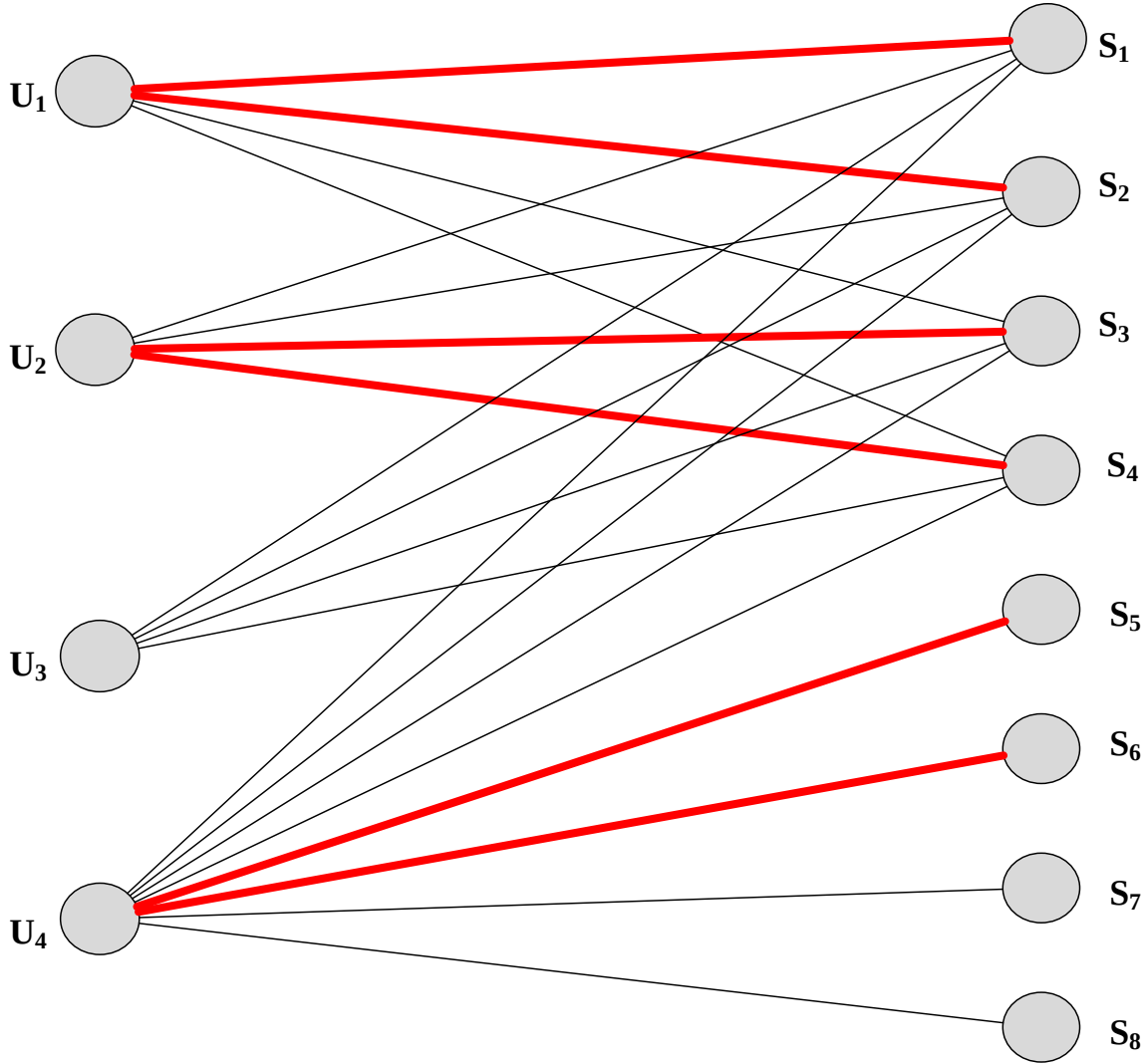
Böylelikle, sistemin maksimum $\mathcal{H}$ -eşlemesi bulunmuş olur. Son adım olarak çoğullanan kullanıcı düğümleri Şekil 4.11’de gösterildiği gibi ters bir işlem ile eski haline getirilmektedir.



Şekil 4.11 : Çoğullanan düğümlerin eski haline getirilmesi.

Diyagramın son hali maksimum eşleme ile beraber Şekil 4.12’deki gibi olmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi, $K = 2$ olduğundan, burada $\mathcal{K}_{1,2}$ eşlemesi yapılmıştır. Her bir kullanıcı düğümünün K adet düğüme eşlenmesi algoritmanın 3. adımıdaki düğüm çoğullaması ile sağlanmıştır. Bu örnekte, maksimum eşleme sonucunda üç

adet $\mathcal{K}_{1,k}$ alt-diyagramı olduğu görülmektedir. Birbirinden bağımsız $\mathcal{K}_{1,k}$ alt-diyagram kopyalarının en büyük toplamı bize maksimum eşlemeyi vermektedir.

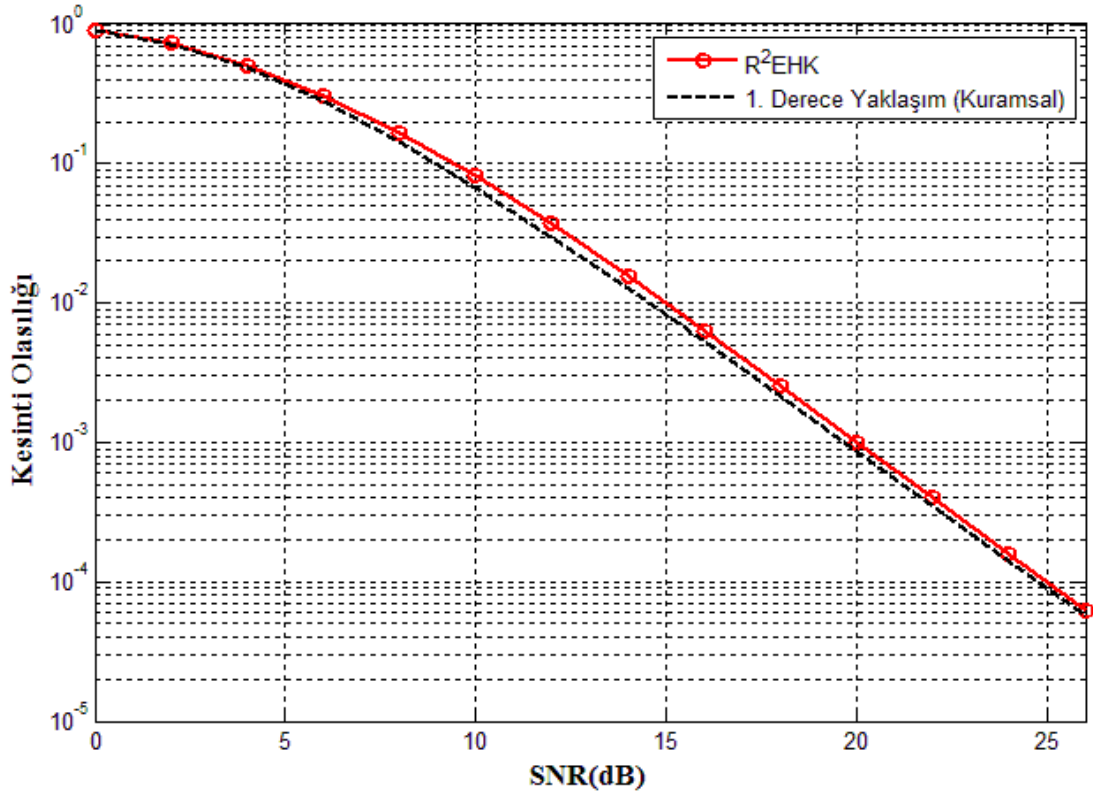


Şekil 4.12 : Maksimum $\mathcal{H}$ -eşlenmiş diyagram.

4.2.3 R^2EHK algoritmasına ilişkin benzetim sonucu

Şekil 4.13'te, R^2EHK algoritmasına ait kesinti olasılığı sonuçları bilgisayar ortamında MATLAB programı kullanılarak çizdirilmiştir. Bu benzetim çalışmalarında, eşik değer kriteri olarak $|[h_m]_n|^2 < \frac{2^{N_c R_s} - 1}{SNR}$ ifadesi kullanılmıştır. Burada $N_c = 4$ ve $R = 1$ 'dir. Benzetim sonucunu karşılaştırmak için [6]'da verilen 1. derece yaklaşımı (first-order approximation) kuramsal sonucuna grafikte yer

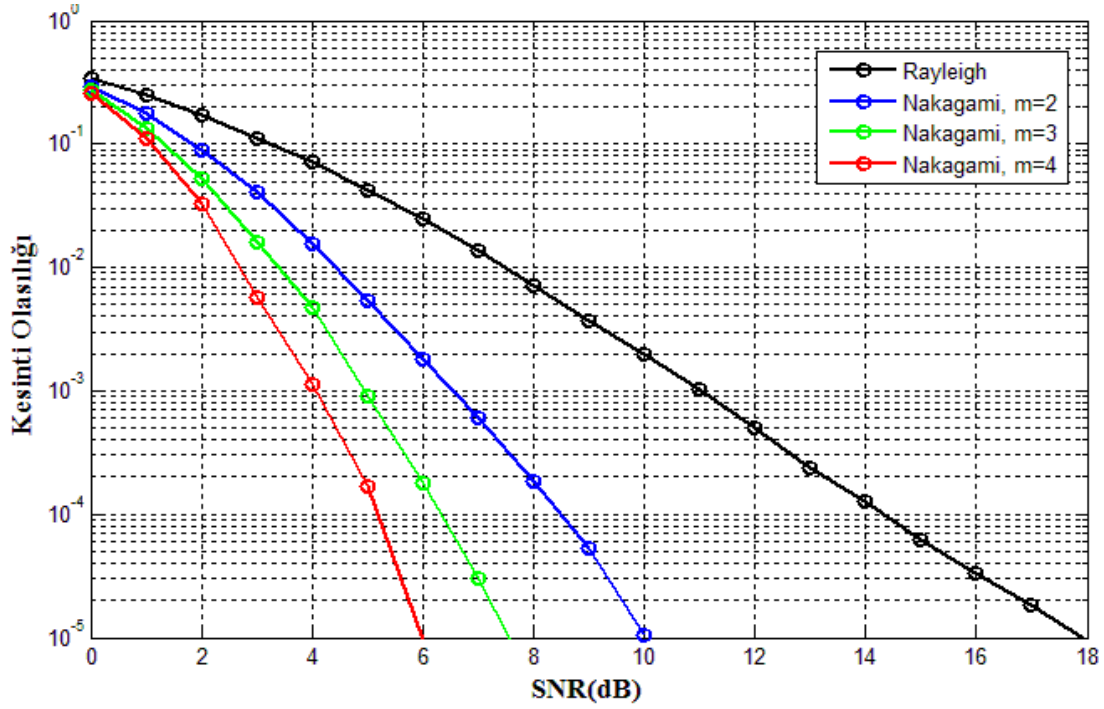
verilmiştir. Görüldüğü üzere yapılan benzetimde kuramsal sonuçta olduğu gibi çeşitleme 2'dir.



Şekil 4.13 : R^2EHK algoritmasına ilişkin kesinti olasılığı benzetim sonucu.

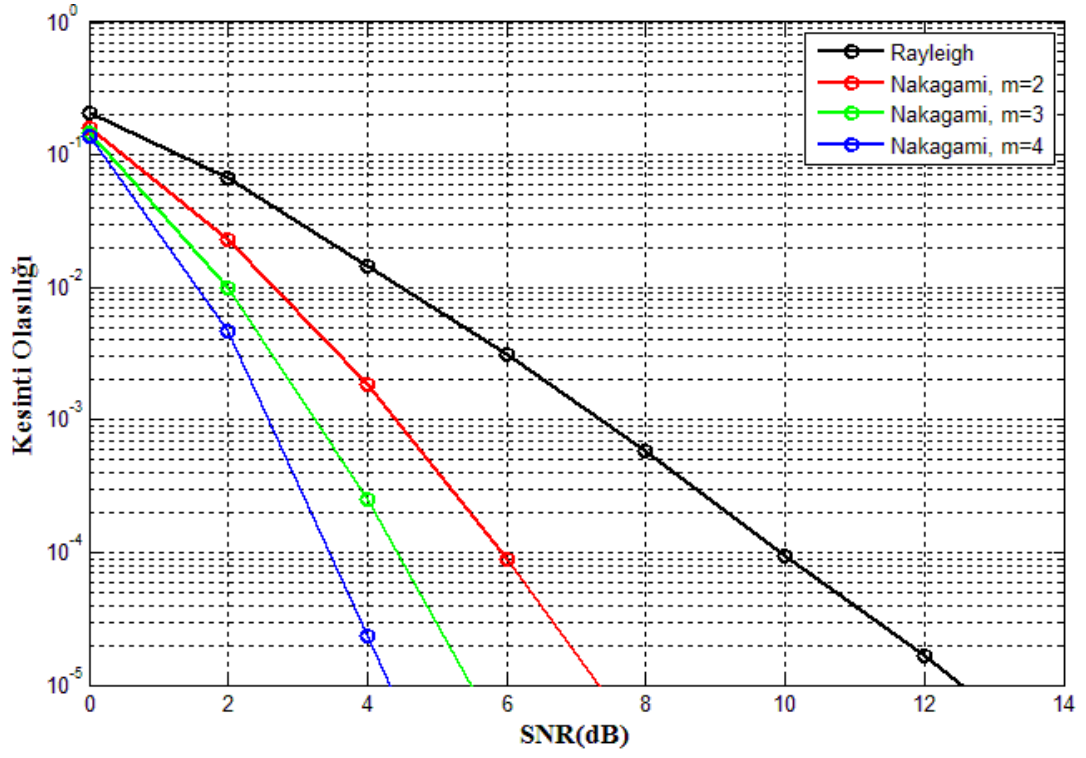
4.2.4 Nakagami-m sönümlmeli kanalda benzetim sonuçları

Bu bölümde, Nakagami-m sönümlmeli kanallarda OFDMA sistemlerindeki alt-taşıyıcı ataması ile ilgili elde edilen benzetim sonuçları incelenmiştir. Daha önce elde edilen Rayleigh sönümlmeli kanallardaki benzetim sonuçları ile burada bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 4.14'te, $M = 3$ kullanıcı ve $N = 3$ alt-taşıyıcılı OFDMA sistemlerinde kullanıcı kesinti olasılığına ait benzetim sonuçları gösterilmektedir.

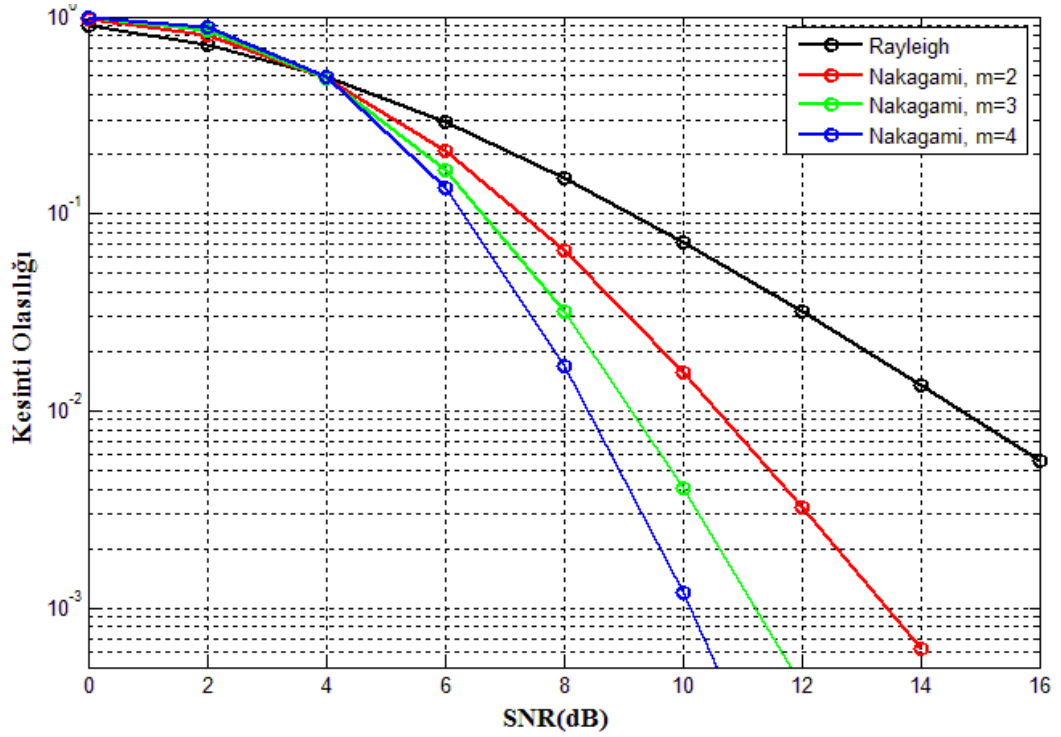


Şekil 4.14 : $M = 3$ ve $N = 3$ için maksimum eşleme sonucunda Nakagami-m kanallarda elde edilen kesinti olasılığı.

Şekilden görüldüğü gibi m parametresi arttıkça kesinti olasılığı beklenildiği gibi iyileşmektedir. Örneğin, 10^{-4} kesinti olasılığı için $m = 1$ ve $m = 2$ için çizilen eğriler arasında 5dB fark bulunmaktadır. $m = 1$ ve $m = 3$ için çizilen eğriler arasında ise aynı kesinti olasılığı değeri için 8 dB fark bulunmaktadır. Ayrıca, m değerinin artması çeşitleme kazancı da sağlamaktadır. Aynı SNR değerlerinde daha düşük kesinti olasılığı elde edilmektedir. Şekilden görüleceği gibi Nakagami-m kanallarda çizilen eğrilerin eğimleri de m parametresine bağlı olarak artmaktadır. Bu da çeşitleme derecesinin arttığını göstermektedir.



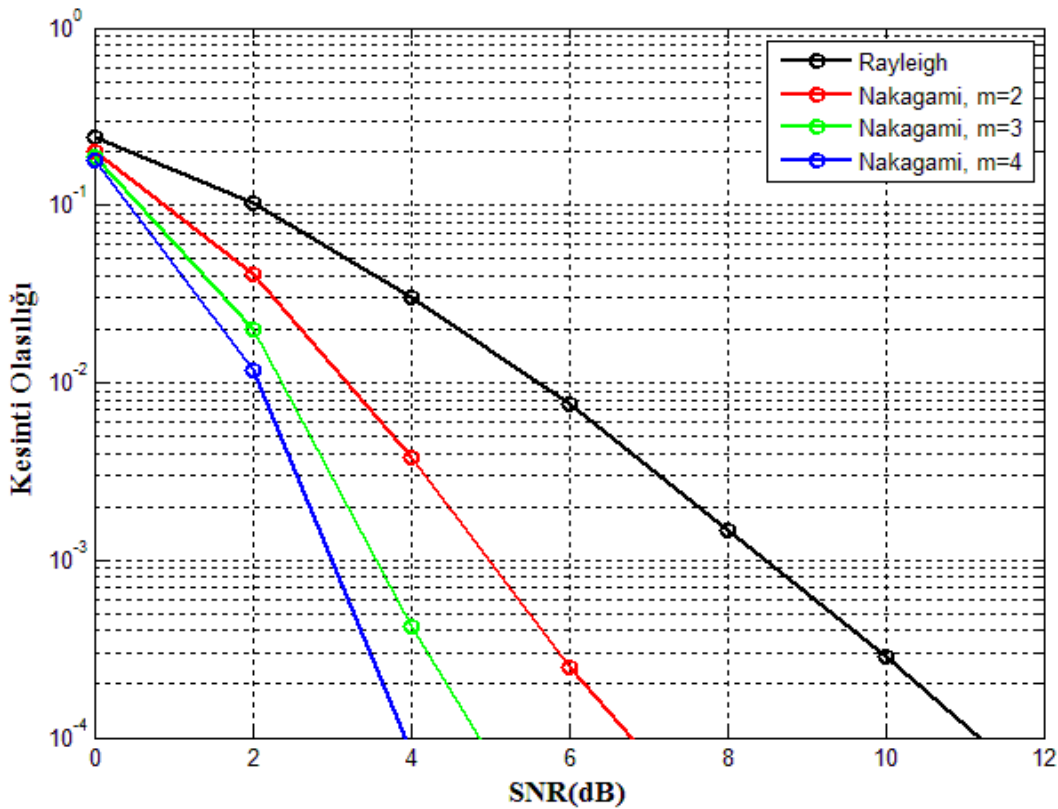
Şekil 4.15 : $M = 3$ ve $N = 4$ ve $L = 4$ Nakagami-m kanallarda elde edilen kesinti olasılığı.



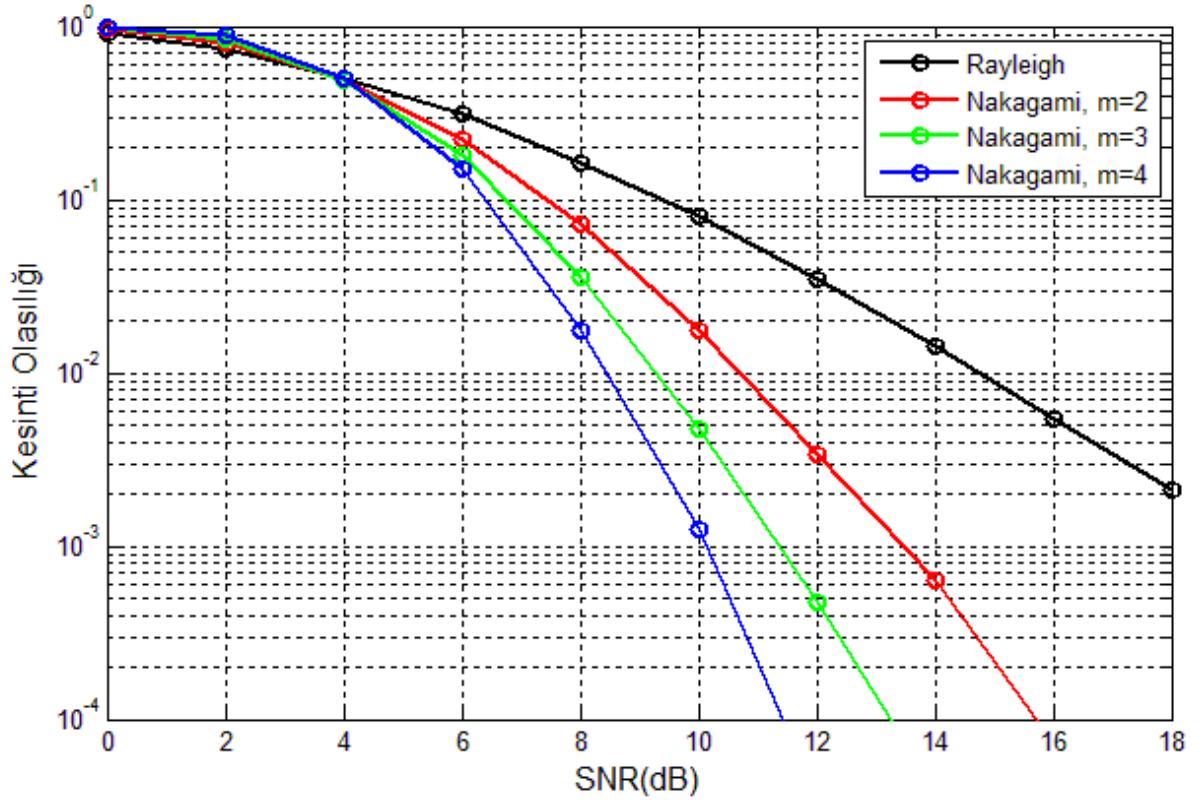
Şekil 4.16 : $M = 3$ ve $N = 4$ ve $L = 2$ için Nakagami-m kanallarda elde edilen kullanıcı kesinti olasılığı.

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da $M = 3$ kullanıcı ve $N = 4$ alt-taşıyıcı OFDMA sistemlerinde alt-taşıyıcı ataması ile ilgili benzetim sonuçları yer almaktadır. Şekil 4.15'te her bir alt-taşıyıcı bir uyumluluk bandgenişliği içerisinde ($L = 4, N_c = 1$) varsayılırken Şekil 4.14'te bir uyumluluk bandgenişliği içerisinde iki adet alt-taşıyıcı ($L = 2, N_c = 2$) yer almaktadır. Uyumluluk bandgenişliği sayılarını değiştirmek, şekillerden anlaşılacağı gibi çeşitleme derecesini değiştirmektedir. Şekil 4.15'te uyumluluk bandgenişliği sayısı $L = 4$ iken Rayleigh kanal için çeşitleme derecesi 4'tür. Nakagami kanalda $m = 2$ için ise çeşitleme derecesi 8 olmaktadır. Şekil 4.16'da, $L = 2$ olduğundan dolayı Rayleigh kanal için çeşitleme derecesi 2'dir. Nakagami kanallarda $m = 2$ olduğu durumda çeşitleme derecesi 4, $m = 3$ olduğu durumda ise çeşitleme derecesi 6 olmaktadır.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de $M = 4$ kullanıcı ve $N = 4$ alt-taşıyıcı OFDMA sistemlerinde alt-taşıyıcı ataması ile ilgili benzetim sonuçları gösterilmektedir.

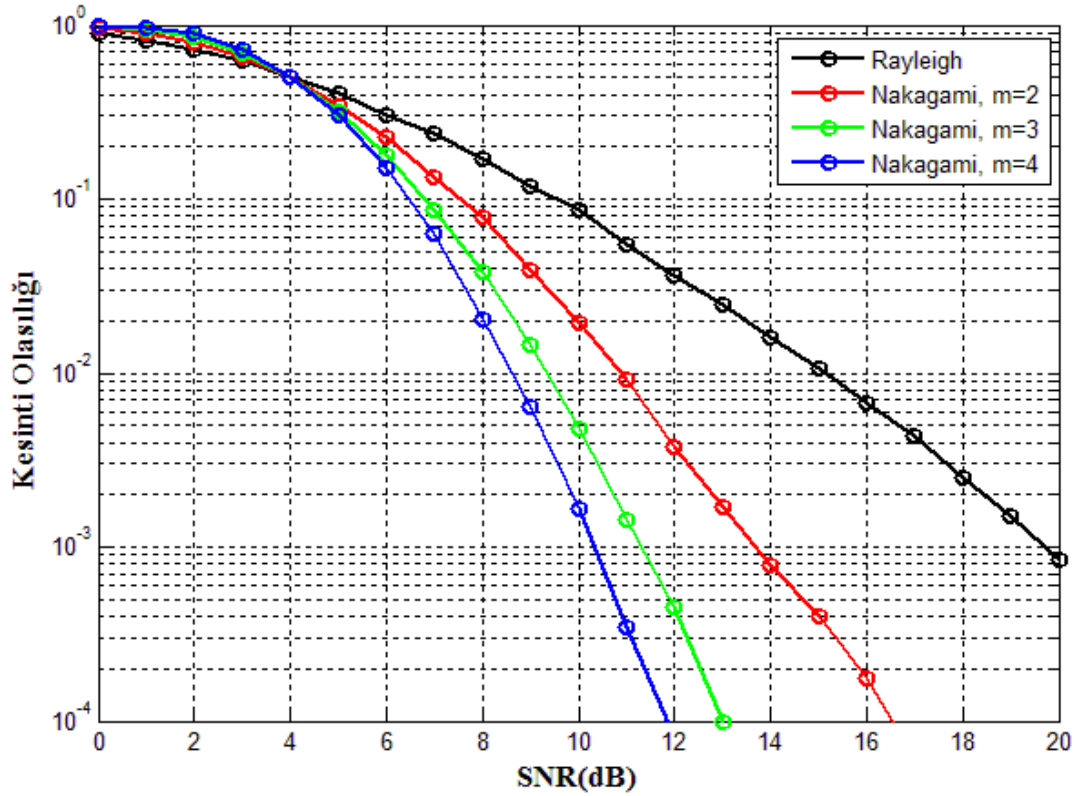


Şekil 4.17 : $M = 4$ ve $N = 4$ ve $L = 4$ için Nakagami-m kanallarda elde edilen kullanıcı kesinti olasılığı.



Şekil 4.18 : $M = 4$ ve $N = 4$ ve $L = 2$ için Nakagami- m kanallarda elde edilen kullanıcı kesinti olasılığı.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de $M = 4$ kullanıcı ve $N = 4$ alt-taşıyıcı OFDMA sistemlerinde alt-taşıyıcı ataması ile ilgili benzetim sonuçları yer almaktadır. Şekil 4.17’deki sistemde her bir alt-taşıyıcı bir uyumluluk bandgenişliği içerisinde ($L = 4, N_c = 1$) varsayılmaktadır. Şekil 4.18’de bir uyumluluk bandgenişliği içerisinde iki adet alt-taşıyıcı ($L = 2, N_c = 2$) yer almaktadır. Şekil 4.17’de $L = 4$ olduğundan Rayleigh kanal için çeşitleme derecesi 4’tür. Nakagami kanalda $m = 2$ için ise çeşitleme derecesi yüksek SNR’lara gidildikçe 8 olmaktadır. Şekil 4.18’de Rayleigh kanal için çeşitleme derecesi 2’dir. Nakagami kanallarda $m = 2$ olduğu durumda çeşitleme derecesi 4, $m = 3$ olduğu durumda ise çeşitleme derecesi 6 olmaktadır.



Şekil 4.19 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için Nakagami- m kanallarda elde edilen kullanıcı kesinti olasılığı.

Şekil 4.19’da $M = 8$ kullanıcı ve $N = 4$ alt-taşıyıcı OFDMA sistemlerinde R^2EHK algoritması kullanılması durumunda Nakagami- m sönümlmeli kanallardaki kesinti olasılığı gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, m parametresinin artması ile çeşitleme kazancı sağlanmakta ve çeşitleme derecesi artmaktadır. 10^{-4} kesinti olasılığı değerinde Rayleigh sönümlmesine ilişkin eğri ve $m = 2$ durumundaki eğri arasında 6 dB fark bulunmaktadır. $m = 2$ ve $m = 3$ durumundaki eğriler arasında ise aynı kesinti olasılığı değeri için 2,5 dB fark bulunmaktadır; fakat $m = 3$ ve $m = 4$ durumundaki eğriler arasında 0.4 dB kadar bir fark bulunmaktadır. Buradan da anlaşılabileceği gibi m artsa da elde edilen çeşitleme kazancı daha az olmaktadır.

Sonuçlar kuramsal olarak analiz edilirse çeşitleme derecesinin $1/SNR^m$ ifadesinden belirlenebileceği gösterilebilir.

5. KULLANICILARA FARKLI SAYIDA ALT-TAŞIYICI ATAMASI

Bu bölüme kadar olan kısımlarda kullanıcılara her zaman eşit sayıda alt-taşıyıcı ataması yapıldığı varsayılmıştır. Ancak, bu durum her zaman böyle olmayabilir. Bazı durumlarda kullanıcıların farklı ihtiyaçları doğrultusunda bu kullanıcılara farklı sayılarda alt-taşıyıcı atanması söz konusu olabilmektedir. Örneğin, belli kullanıcılar sadece ses verisi gönderirken diğer kullanıcılar video verisi gönderebilmektedir. Bu durumda kullanıcıların ihtiyaç duydukları alt-taşıyıcı sayıları, farklı veri türlerinin farklı büyüklükte bandgenişliğine sahip olmasından dolayı değişmektedir. Farklı sayıda alt-taşıyıcı atamasının yanı sıra kullanıcı başına değişen bandverimliliği durumu da göz önüne alınmalıdır. Bu bölüme kadar kullanıcı başına bandverimliliği sabit olarak kabul edilmiştir. Kullanıcıların, farklı servisleri kullanması durumunda farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılması gerektiğinden bu kullanıcılara vaad edilen bandverimliliği de değişiklik gösterecektir.

5.1 Kullanıcı Başına Sabit Bandverimliliği

Bu kısımda, sistemdeki her bir kullanıcının sağlaması gereken iletim oranının aynı olması durumunda kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması yapıldığı varsayılmıştır. Daha önceki örneklerden $M = 4$ kullanıcı $N = 8$ alt-taşıyıcılı sistem göz önüne alınırsa, bandverimliliği $R = 1$ bit/sn/Hz için her bir kullanıcıya sabit $k = 2$ adet alt-taşıyıcı atanmaktadır. Farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması için sabit bir k değeri yerine bir $k = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$ vektörü düşünülebilir. $i = 1, 2, \dots, M$ olmak üzere her u_i kullanıcısına k_i adet alt-taşıyıcı atanacaktır. Bu durumda, her bir kullanıcı için iletim oranları $R_{s_i} = \frac{R}{k_i}$ olarak yazılabilir. Alt-taşıyıcı kesinti olasılığı ifadesi de [6]'daki gösterimden yola çıkılarak Rayleigh kanallar için aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$p_{s_i} = \Pr \left\{ \frac{1}{N_c} \log_2(1 + |[h_i]_n|^2 \text{SNR}) < R_{s_i} = \frac{R}{k_i} \right\},$$

$$p_{s_i} = 1 - \exp \left\{ - \frac{2^{N_{c k_i} \frac{R}{k_i}} - 1}{SNR} \right\}. \quad (5.1)$$

Aşağıdaki koşul sağlanmadığı sürece s_n alt-taşıyıcısı bir u_i kullanıcısı için kesintide demektir:

$$|[h_i]_n|^2 < \frac{2^{N_{c k_i} \frac{R}{k_i}} - 1}{SNR}. \quad (5.2)$$

Sabit sayıda alt-taşıyıcı atanması durumunda adalet kriteri ön plana çıkmaktadır. Ancak, farklı sayıda alt-taşıyıcı atanma durumunda ise kullanıcılar arasındaki adalet durumu biraz farklılık göstermektedir. Baz istasyonu, kullanıcılara alt-taşıyıcı ataması yaparken, kullanıcılar için atama önceliği konusunda yine aynı davranışı gösterecektir; yani her kullanıcıya eşit atama önceliği verilmektedir. Ancak, buradaki amaç her bir kullanıcının ihtiyacına yönelik alt-taşıyıcı ataması yapmak olduğundan atanan alt-taşıyıcı sayısı değişiklik gösterecektir. Sabit sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılması durumunda, ayrı ayrı her bir kullanıcının kesinti olasılığı incelendiğinde, tüm kullanıcıların eşit kesinti olasılığına sahip olduğu görülmektedir. Ancak, farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması nedeniyle her bir kullanıcının kesinti olasılığının farklı olması beklenmektedir. Kullanıcı başına farklı sayıda alt-taşıyıcı atamasına ilişkin bu tezde geliştirilen bir algoritma aşağıdaki gibi verilmektedir:

Algoritma 3. Çoklu $R^2 EHK$

- 1- $i = 1, \dots, M$ olmak üzere $\deg(u_i) < k_i$ olan her $u_i \in U$ ve $\deg(s) = 0$ olan her $s \in S$ i sil ve ayrıca onlara bağlı olan bağlantıları kaldır.
- 2- U kümesindeki düğümleri eşit olasılık ile rastgele döndür.
- 3- U kümesindeki her u_i düğümünü k_i düğüme genişlet.
- 4- $M \leftarrow \emptyset$
- 5- **repeat**
- 6- BFS uygulayarak en kısa artırımlı yolu bul.
- 7- DFS uygulayarak varsa en kısa artırımlı yolların maximal kümesini bul.
- 8- $M \leftarrow M \oplus P$ işlemini uygula.
- 9- Artırımlı yol bulamayana **kadar** algoritmaya devam et.
- 10- 3. adımdaki düğüm çoğullaması işleminin tersini uygulayarak kullanıcıları eski haline getir.
- 11- $\mathcal{M}_{K_1, K}$ eşlemesini çıkış olarak al ve algoritmayı durdur.

Algoritma 3'te, kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcılar atanması nedeniyle bu algoritmaya Çoklu- R^2EHK algoritması adı verilmiştir. Algoritmanın adımlarından anlaşılacağı üzere, bu algoritma da $\mathcal{H}$ -eşleme temellidir. Bu algoritmada $\mathcal{H}_i$, her kullanıcıya ilişkin bir alt-diyagramdır; fakat Algoritma 2'de olduğu gibi $\mathcal{H}$, burada her zaman sabit bir alt-diyagram değildir. $k = [k_1 \dots k_i]$ vektörüne göre maksimum $\mathcal{H}$ -eşleme, $\mathcal{K}_{1,k_i}$ şeklinde de gösterilebilmektedir. Algoritma 2'nin birinci ve üçüncü adımlarında uygulanan işlemler $K = \left\lfloor \frac{N}{M} \right\rfloor$ yerine k_i terimine göre uygulanmıştır. Bu değişiklik, küçük bir değişiklik gibi görünse de pratik anlamda performans açısından oldukça farklı sonuçlar elde edilmektedir. Birinci adımda, kanal katsayılarının eşik değerler ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen, alt-taşıyıcıların kesinti durumlarını belirten matriste her kullanıcı için satırlara ayrı ayrı bakılır ve eğer o satırdaki 1'lerin toplamı k_i 'den küçük ise, işlem karmaşıklığı yaratmaması için o satır işleme tabi tutulmaz. Çünkü satırdaki 1'lerin toplamının k_i 'den küçük olması durumunda, o kullanıcı kesinti durumunda kalmış demektir.

5.2 Kullanıcı Başına Değişen Bandverimliliği

Önceki bölümde kullanıcı başına sabit bandverimliliği olduğu varsayılmıştı. Pratik açıdan düşünülürse, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre her kullanıcıya aynı bandverimliliği yerine farklı bandverimliliği vaad edilebilir. Bu durumda, kullanıcıların iletim yaptığı kanallar için gerekli olan kapasite değişikliği gösterecektir. Bu da, kullanıcıların kesintide kalma durumlarını etkileyecektir. Kullanıcılar için farklı oranlarda bandverimliliği kullanmak amacıyla sabit bir R değeri yerine, $i = 1, 2, \dots, M$ olmak üzere bir $R = [R_i \dots R_M]$ vektörü düşünülebilir. Her u_i kullanıcısının R_i bit/sn/Hz bandverimliliğini karşılaması gerekmektedir. Bu durumda, her bir kullanıcı için iletim oranları $R_{s_i} = \frac{R_i}{k_i}$ olarak yazılabilir.

Alt-taşıyıcı kesinti olasılığı ifadesi [6]'daki gösterimden yola çıkılarak Rayleigh kanallar için aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$p_{s_i} = \Pr \left\{ \frac{1}{N_c} \log_2 (1 + |[h_i]_n|^2 \text{SNR}) < R_{s_i} = \frac{R_i}{k_i} \right\},$$

$$= 1 - \exp \left\{ - \frac{2^{N_c \frac{R_i}{k_i}} - 1}{SNR} \right\}. \quad (5.3)$$

Kullanıcı başına sabit bandverimliliği durumundaki gösterimler ile buradaki gösterimlerin benzer olduğu görülmektedir; fakat burada farklı olarak $R_{s_i} = \frac{R_i}{k_i}$ ifadesindeki her bir kullanıcı için karşılanması gereken bandverimliliği de hesaba katılmaktadır.

Aşağıdaki koşul sağlanmadığı sürece s_n alt-taşıyıcısı bir u kullanıcısı için kesintide demektir:

$$|[h_i]_n|^2 < \frac{2^{N_c \frac{R_i}{k_i}} - 1}{SNR}. \quad (5.4)$$

Kullanıcıların, ihtiyaçlarına göre, daha fazla ya da daha büyük boyutlarda veri iletimi yapabilmeleri için bu kullanıcılara daha çok sayıda alt-taşıyıcı ataması yaparak daha fazla oranda bandverimliliği vaad edilebilir. Böylece, kullanıcılar daha fazla veriyi aynı anda iletmış olurlar. Kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı ve kullanıcı başına değişen bandverimliliği vaad edilmesi durumu için kullanılan algoritma aşağıdaki gibi verilmektedir:

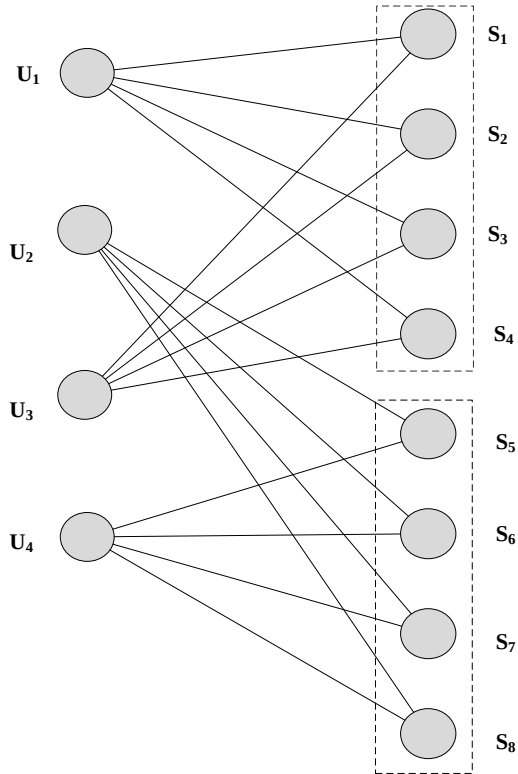
Algoritma 4. Değişen Bandverimliliği için Çoklu- R^2 EHK Algoritması

- 1- $i = 1, \dots, M$ olmak üzere her kullanıcının karşılaması gereken bandverimliliğinin R_i olması durumunda $\deg(u_i) < k_i$ olan her $u_i \in U$ ve $\deg(s) = 0$ olan her $s \in S$ i sil ve ayrıca onlara bağlı olan bağlantıları kaldır.
- 2- U kümesindeki düğümleri eşit olasılık ile rastgele döndür.
- 3- U kümesindeki her u_i düğümünü k_i düğüme genişlet.
- 4- $M \leftarrow \emptyset$
- 5- **repeat**
- 6- BFS uygulayarak en kısa artırımı yolu bul
- 7- DFS uygulayarak varsa en kısa artırımı yolların maximal kümesini bul.
- 8- $M \leftarrow M \oplus P$ işlemini uygula.
- 9- Artırımı yol bulamayana **kadar** algoritmaya devam et.
- 10- 3. adımdaki düğüm genişletilmesi işleminin tersini uygulayarak kullanıcıları eski haline getir.
- 11- $\mathcal{M}_{K_1, k_i}$ eşlemesini çıkış olarak al ve algoritmayı durdur.

Algoritma 4'te, Algoritma 3'e göre tek fark, kullanıcılara vaad edilen bandverimliliği R 'nin kullanıcılar için farklı olmasıdır. Pratik açıdan bu fark, her kullanıcı için kesinti olasılığını değiştirmektedir. Her kullanıcı için eşik değerler farklı olacağından bazı kullanıcılar daha fazla kesintide kalırken diğerleri daha az kesintide kalmaktadır. Birinci adımda, en başta kesintide kalan kullacılara ait satırlar işleme tabi tutulmadığından, diğer kullanıcılar için Hopcroft-Karp algoritması uygulanır ve buradan bir maksimum $\mathcal{H}$ -eşleme elde edilir.

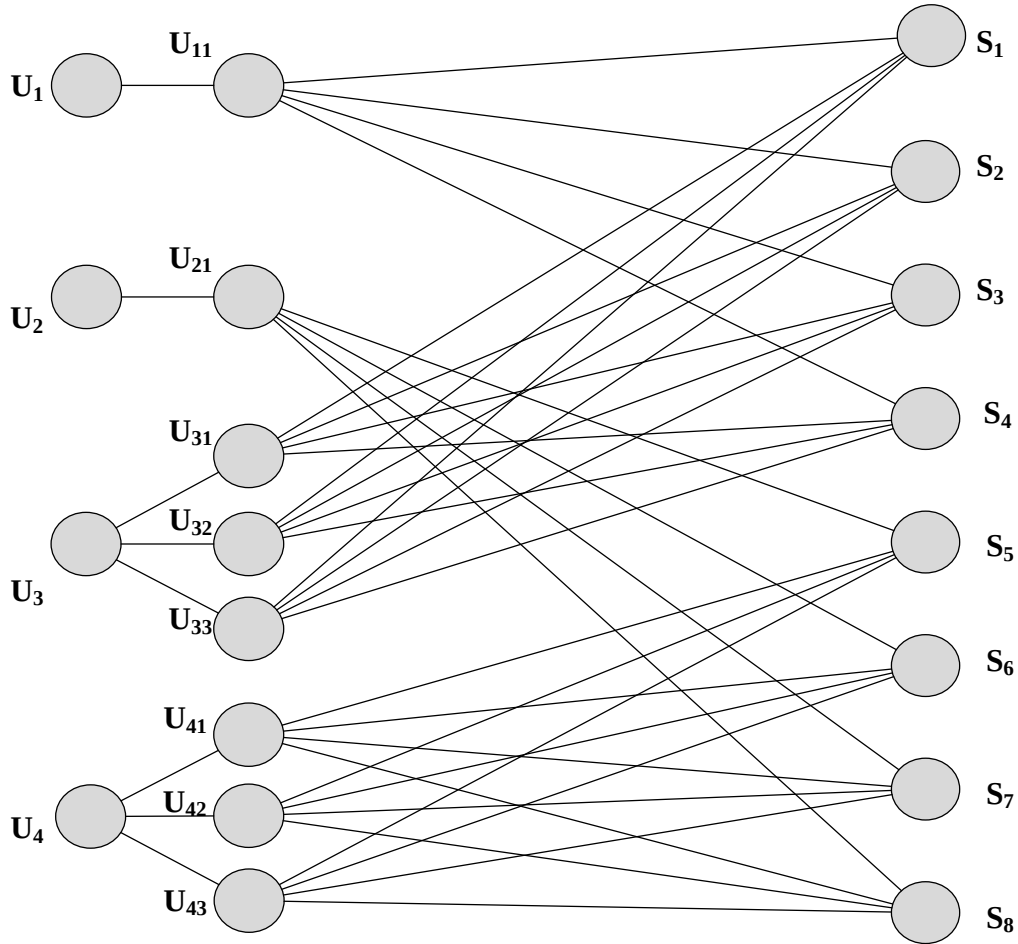
5.3 Çoklu- R^2EHK Algoritması Adımları

Önceki bölümlerde kullanıcı başına sabit ve değişen bandverimliliği durumlarında uygulama adımları belirtilen Çoklu- R^2EHK algoritmasını görsel olarak anlatmak amacıyla örnek olası bir diyagram kullanılmıştır. $U = \{u_1, \dots, u_M\}$, kullanıcı düğümü kümesini ve $S = \{s_1, \dots, s_N\}$, alt-taşıyıcı düğümü kümesini göstermektedir. $M = 4$, $N = 8$, $L = 2$ ve $k = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ durumu ele alınmaktadır. Bu parametrelere sahip örnek rastgele ikili diyagram $G(V_1 \cup V_2, E)$, bir sonraki sayfadaki Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



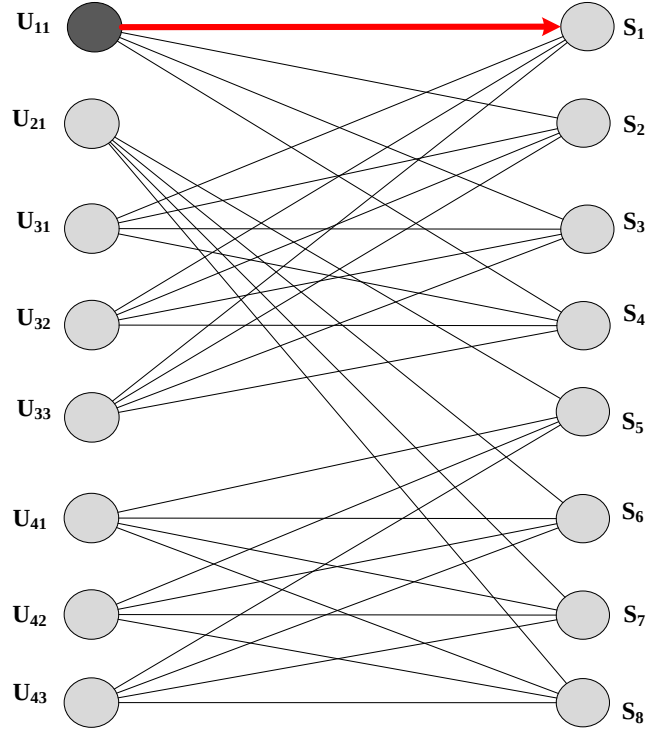
Şekil 5.1 : Kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması için örnek bir rastgele ikili diyagram.

Bu örnekte, döndürme işleminin yapıldığı varsayılmaktadır. Algoritmalarındaki 3.adım için her bir kullanıcı düğümü, $k = [1\ 1\ 3\ 3]$ vektöründeki değerlere göre çoğullanmaktadır. Çoğullanmış kullanıcılar ile oluşturulan yeni diyagram Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Buna göre, 1. ve 2. kullanıcı bir adet, 3. ve 4. kullanıcı üç adet düğüme çoğullanmaktadır.

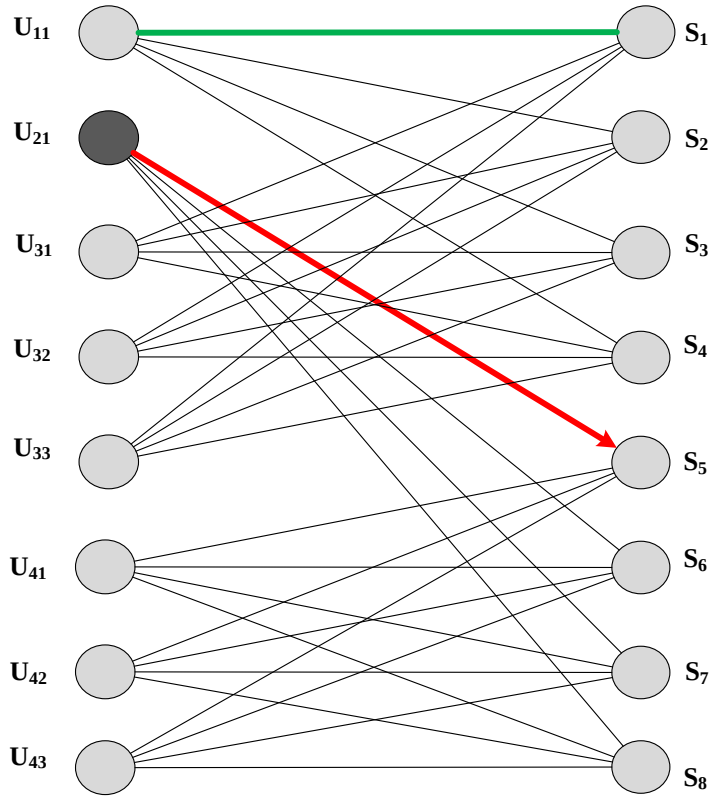


Şekil 5.2 : Kullanıcı düğümlerinin çoğullanması sonucunda oluşan yeni rastgele ikili diyagram.

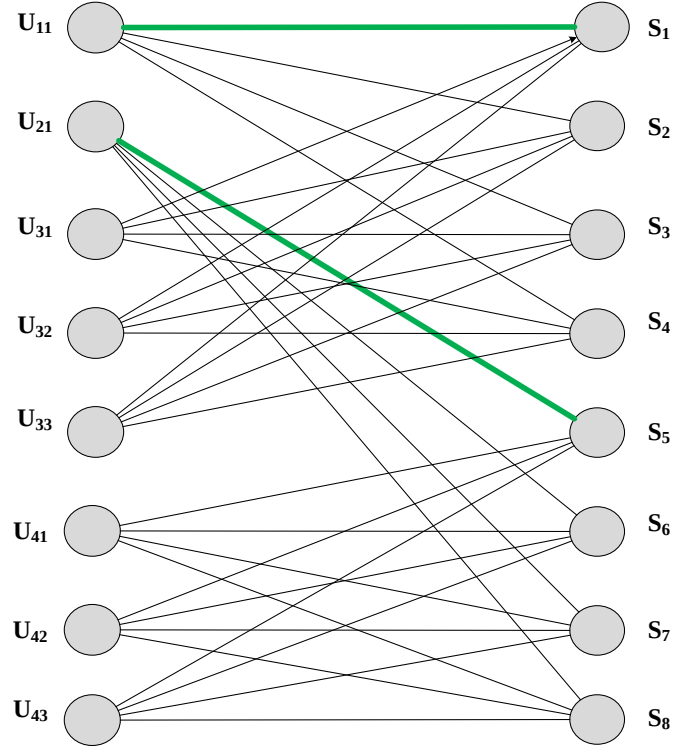
Kullanıcı düğümleri çoğullamasının ardından, diyagram üzerinde BFS ve DFS uygulanarak maksimum eşleme bulunmaktadır. Şekil 5.3’te ilk eşlemenin elde edilmesi gösterilmektedir. Bulunan eşleme (1→1) şeklinde gösterilsin. Şekil 5.4’ten Şekil 5.19’a kadar, bölüm 4.4.2’deki arama algoritmasının buradaki sisteme uygulanmış şekli adım adım gösterilmektedir. Koyu renk ile gösterilen düğümler, yeni bir artırımlı-yol bulmak için o aşamada hangi kullanıcıdan başlanıldığını göstermektedir.



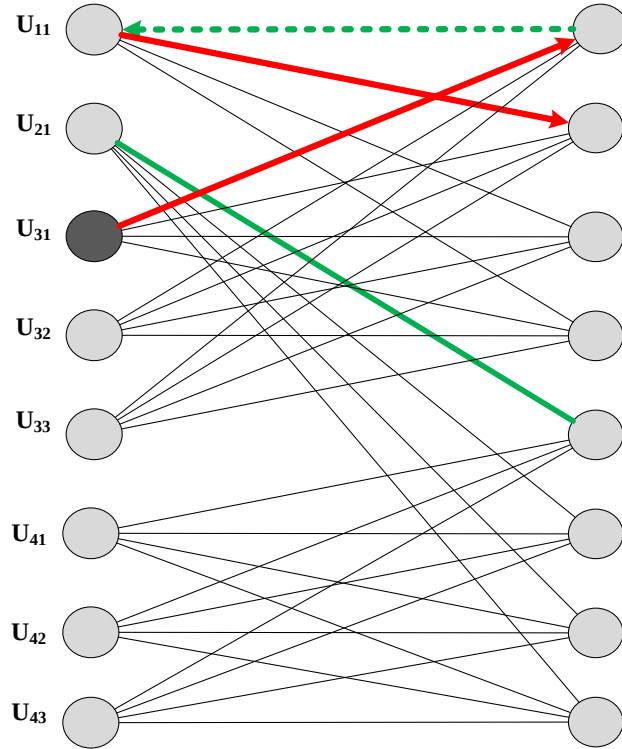
Şekil 5.3 : 1. eşleme, (1→1).



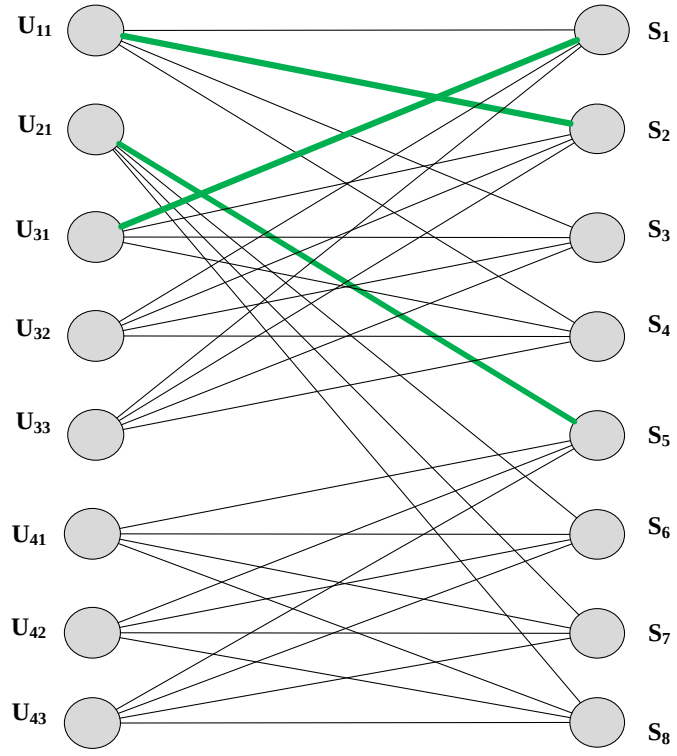
Şekil 5.4 : 2. artırımı yolu bulma.



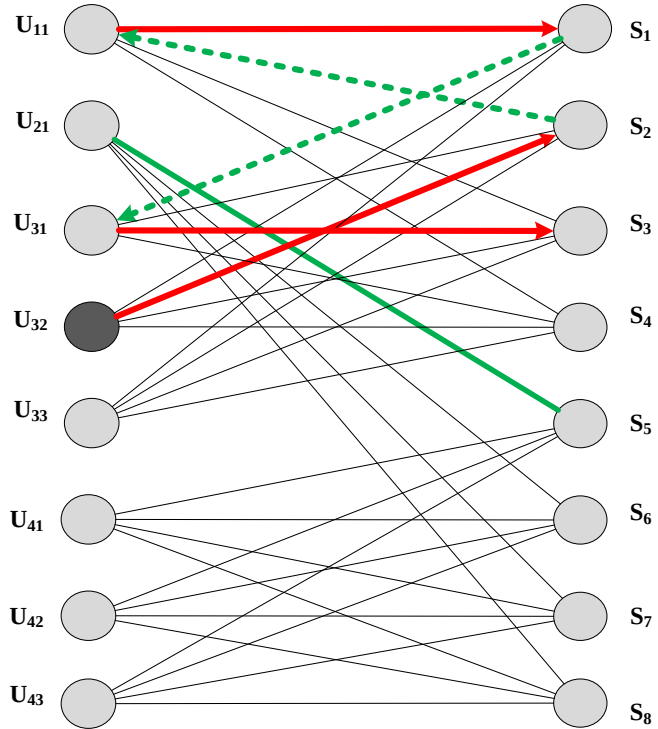
Şekil 5.5 : 2. eşleme (1→1) - (2→5).



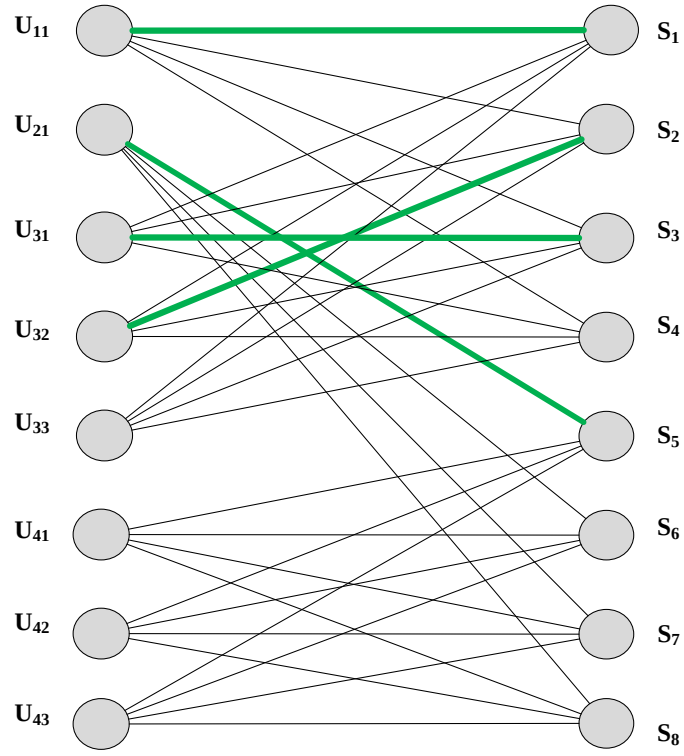
Şekil 5.6 : 3. artırımı yolu bulma.



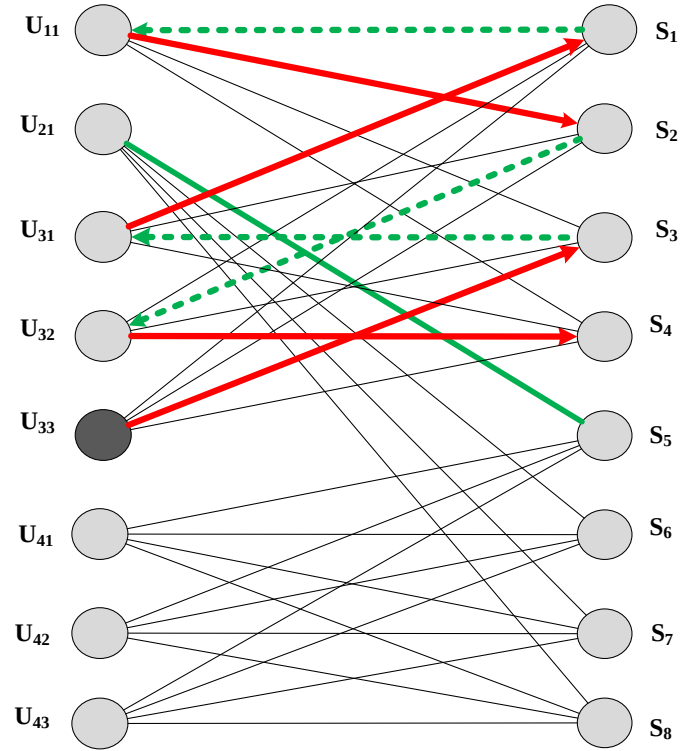
Şekil 5.7 : 3. eşleme, $(1 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 5) - (3 \rightarrow 1)$.



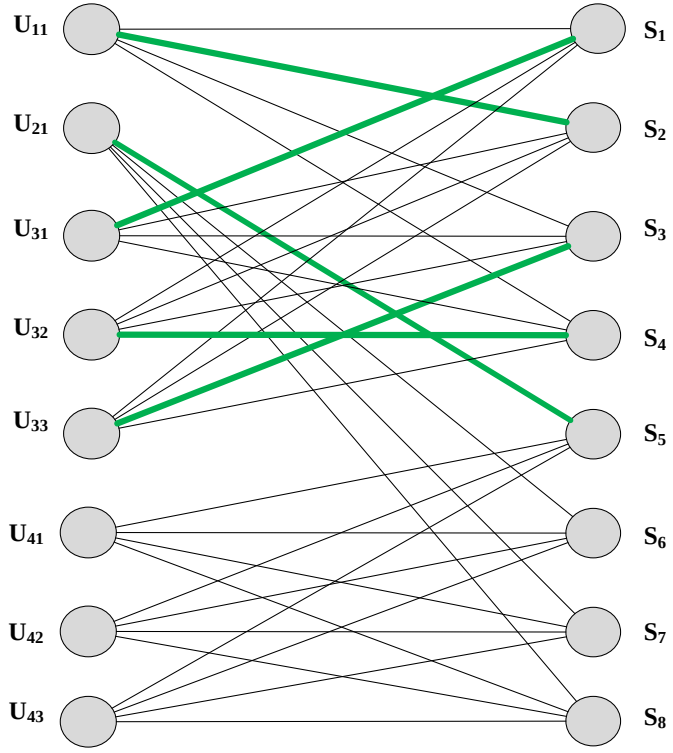
Şekil 5.8 : 4. artırımı yolu bulma.



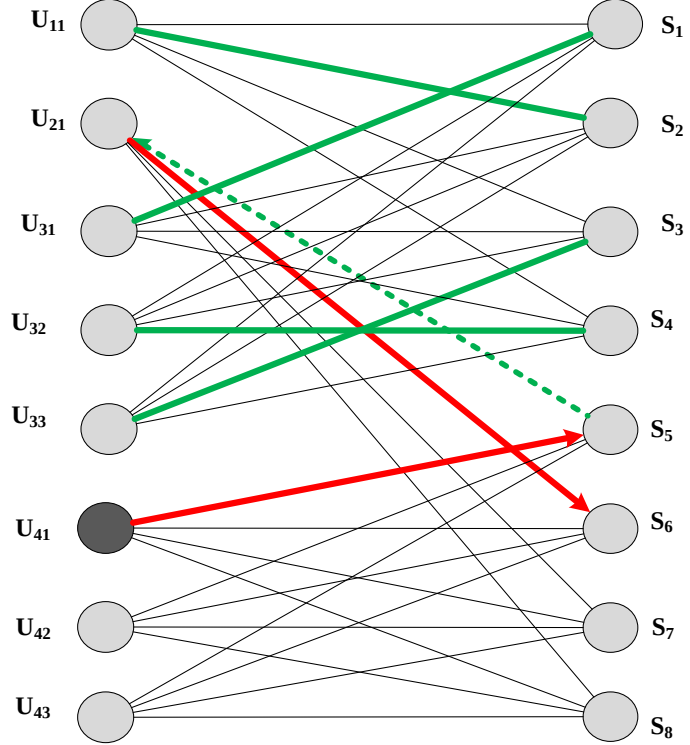
Şekil 5.9 : 4. eşleme, $(1 \rightarrow 1) - (2 \rightarrow 5) - (3 \rightarrow 3) - (4 \rightarrow 2)$.



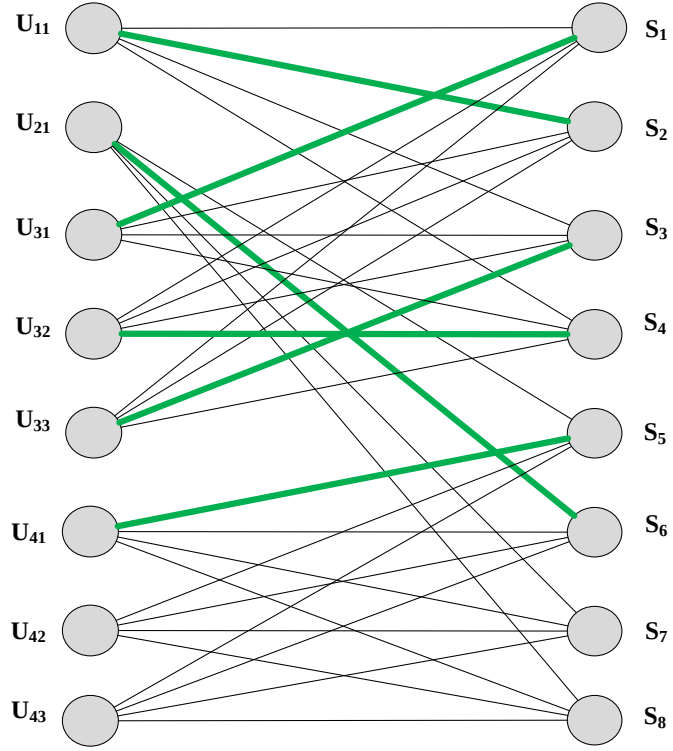
Şekil 5.10 : 5. artırımlı yolu bulma.



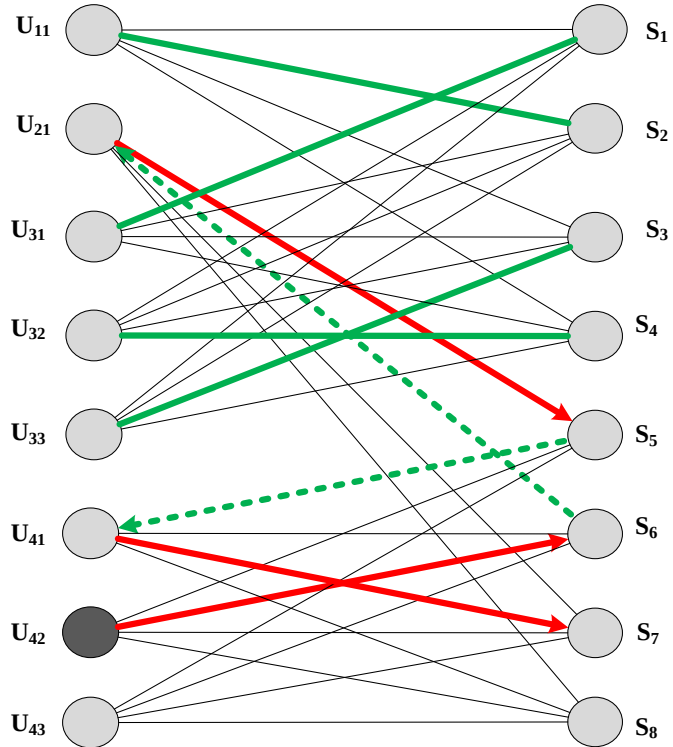
Şekil 5.11 : 5. eşleme, $(1 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 5) - (3 \rightarrow 1) - (4 \rightarrow 4) - (5 \rightarrow 3)$.



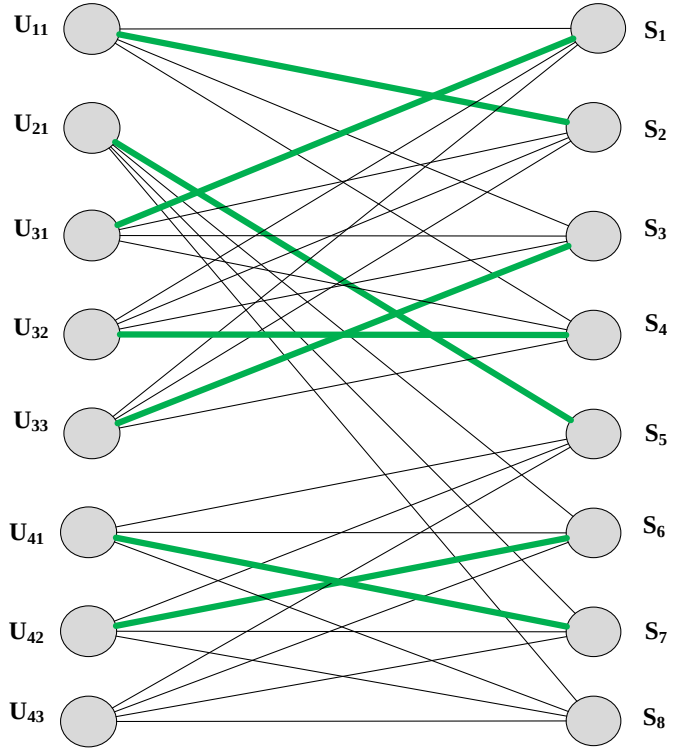
Şekil 5.12 : 6. artırımı yolu bulma.



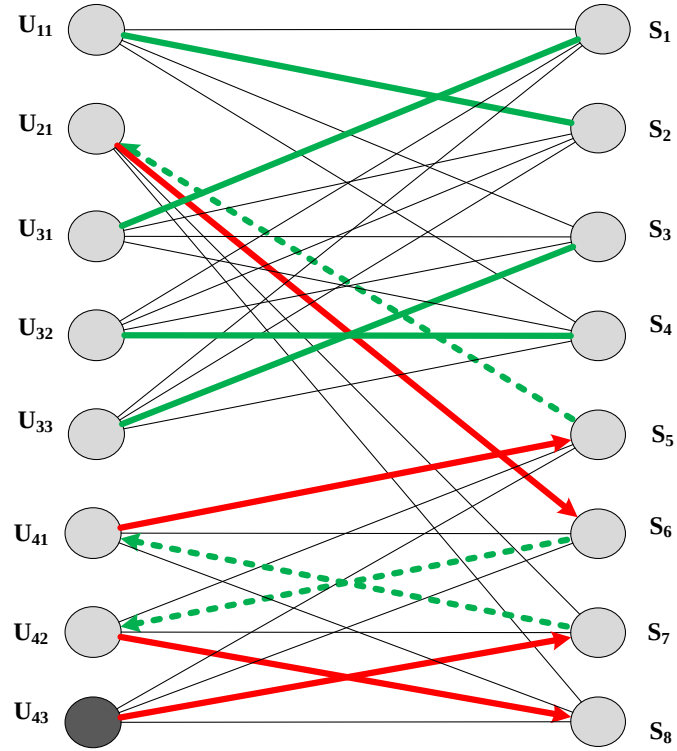
Şekil 5.13 : : 6. eşleme, $(1 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 6) - (3 \rightarrow 1) - (4 \rightarrow 4) - (5 \rightarrow 3) - (6 \rightarrow 5)$.



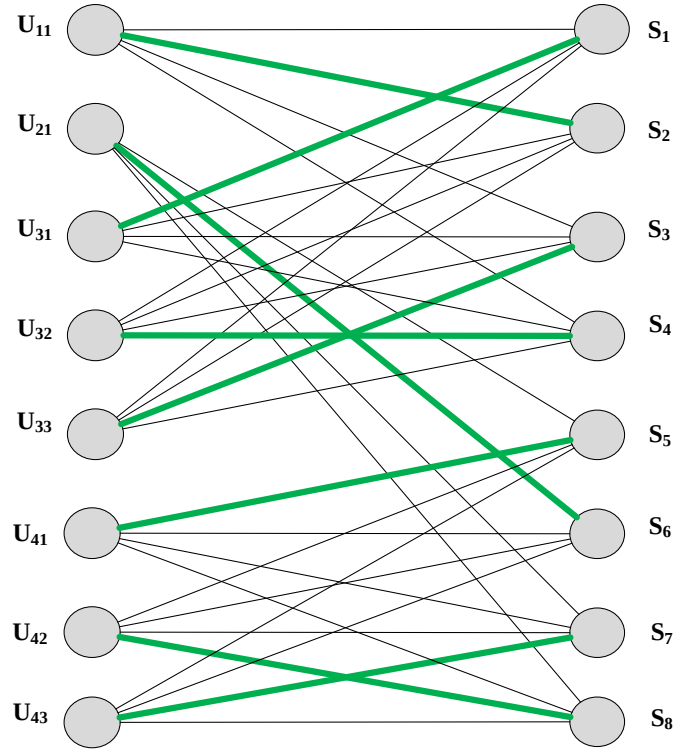
Şekil 5.14 : 7. artırılmış yolu bulma.



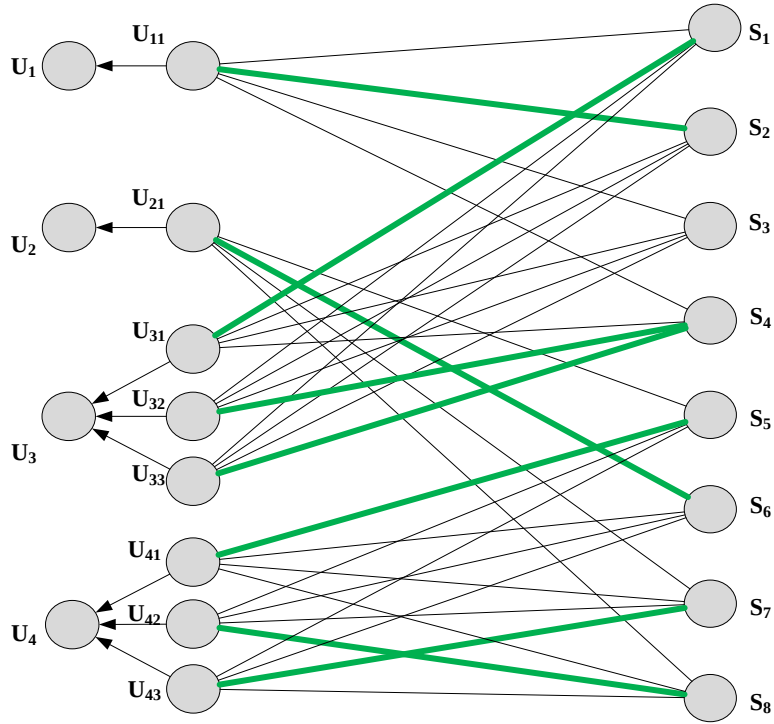
Şekil 5.15 : 6. eşleme, (1→2) - (2→5) - (3→1) - (4→4) - (5→3) - (6→7) - (7→6).



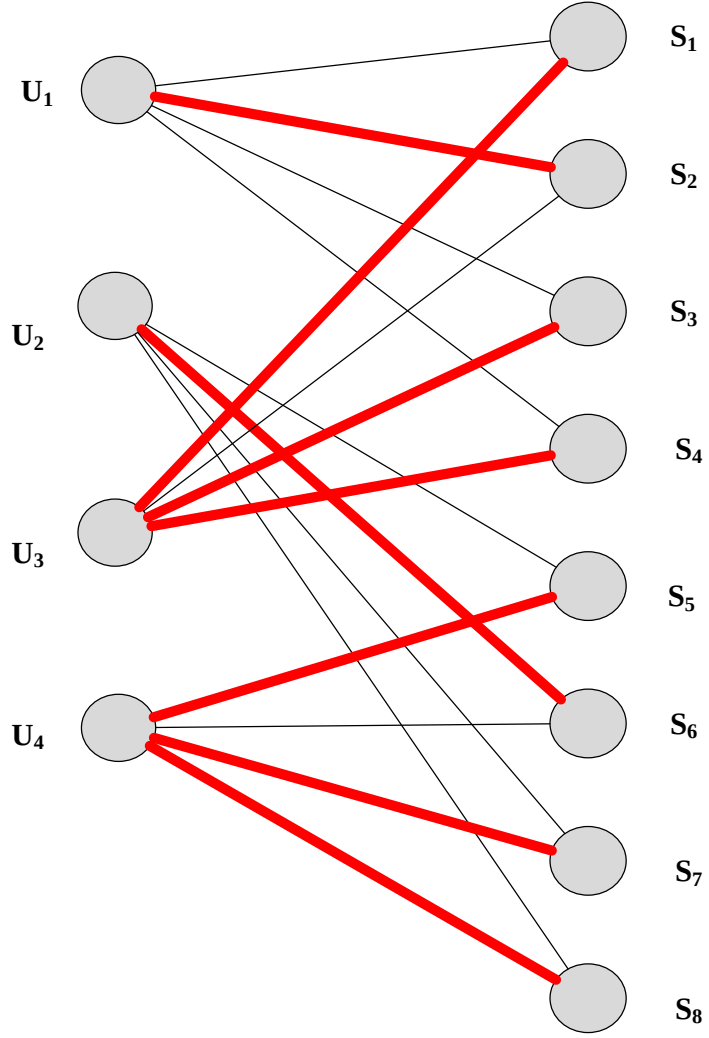
Şekil 5.16 : 8. artırımlı yolu bulma.



Şekil 5.17 : 7. eşleme, $(1 \rightarrow 2) - (2 \rightarrow 6) - (3 \rightarrow 1) - (4 \rightarrow 4) - (5 \rightarrow 3) - (6 \rightarrow 5) - (7 \rightarrow 8) - (8 \rightarrow 7)$.



Şekil 5.18 : Çoğullanan düğümlerin eski haline getirilmesi.



Şekil 5.19 : Çoklu- R^2EHK algoritması ile maksimum eşlenmiş diyagram.

Şekil 5.19’da, algoritmanın diyagrama uygulanması sonrasında elde edilen eşleme sonucu yer almaktadır. 1. ve 2. kullanıcıya birer adet, 3. ve 4. kullanıcıya ise üçer adet alt-taşıyıcı başarılı bir şekilde atanmıştır. Ayrıca hiçbir kullanıcı kesintide kalmamıştır. Bu da önerilen algoritmanın maksimum eşleme yaptığını göstermektedir.

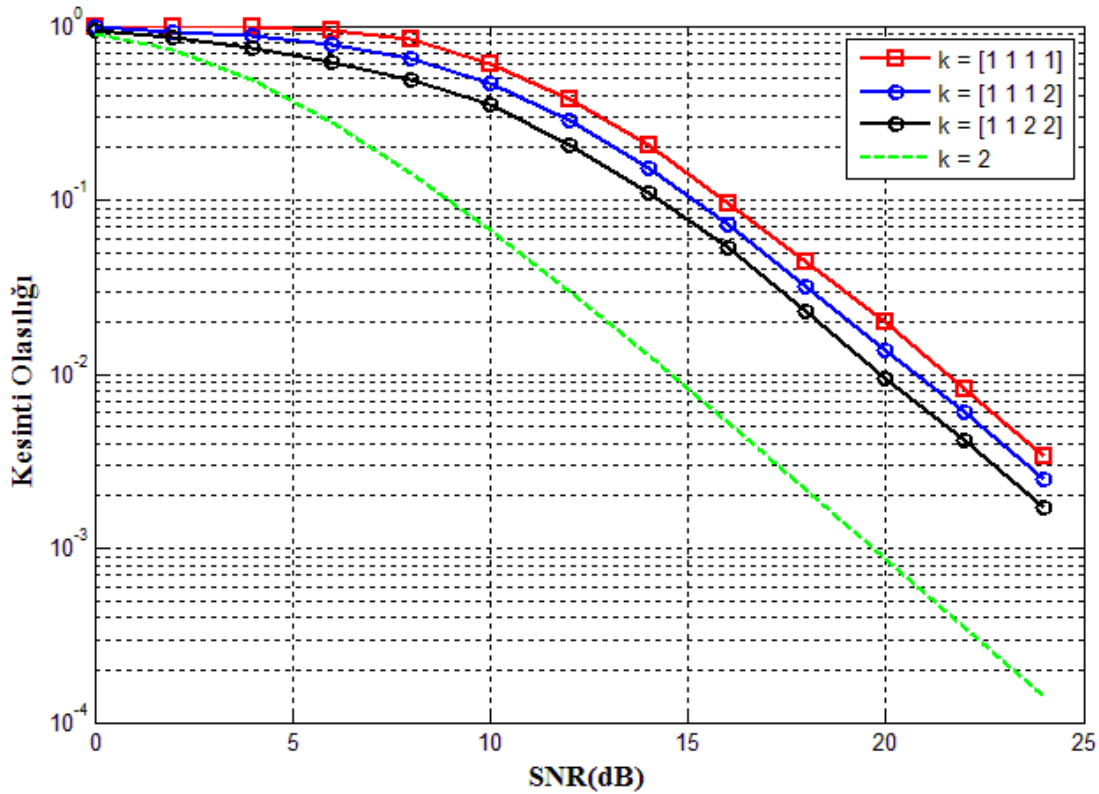
5.4 Kullanıcı Başına Sabit Bandverimliliği ile İlgili Rayleigh ve Nakagami-m Sönümlemeli Kanallardaki Benzetim Sonuçları

Şekil 5.20’de $M = 4, N = 8$ için kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması ile ilgili kesinti olasılığı sonucu gösterilmektedir. Buradaki kesinti olasılığı, genel

(ortalama) olup, kullanıcı başına kesinti olasılığı P_{U_i} olmak üzere, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$P_U = \frac{\sum_{i=1}^M P_{U_i}}{M}. \quad (5.5)$$

Her kullanıcıya sadece bir adet alt-taşıyıcı ataması yapıldığındaki durum ile bazı kullanıcılara atanan alt-taşıyıcı sayılarının birer artırılması durumundaki sonuçlar karşılaştırılmaktadır.



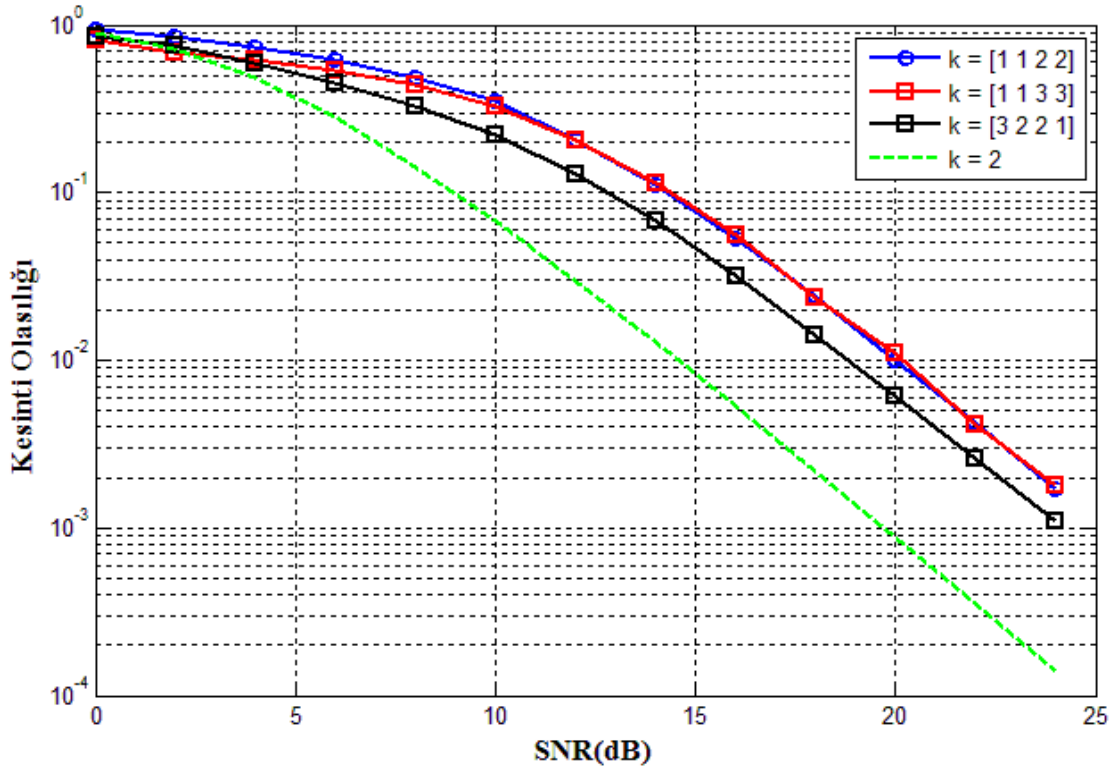
Şekil 5.20 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1 1 1 1]$, $k = [1 1 1 2]$ ve $k = [1 1 2 2]$ durumlarında Rayleigh kanaldaki ortalama kesinti olasılığı.

Sadece dördüncü kullanıcıya iki adet, diğer kullanıcılara bir adet alt-taşıyıcı ataması yapıldığında mavi renkli eğri elde edilmektedir. Hem üçüncü hem de dördüncü kullanıcıya iki adet alt-taşıyıcı, diğer kullanıcılara ise birer adet alt-taşıyıcı ataması yapıldığında ise siyah renkli eğri elde edilmektedir. Kesikli yeşil çizgi ise $k = 2$ durumunda, başka bir deyişle her kullanıcıya iki adet alt-taşıyıcı ataması yapılması durumunda daha önce de elde edilmiş olan Şekil 4.13'teki eğriyi göstermektedir. Her kullanıcıya maksimum sayıda alt-taşıyıcı atandığında kesinti olasılığı büyük oranda iyileşmektedir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta da, Şekil 5.20'de eğrileri elde

edilen sistemin çeşitleme derecesinin Şekil 4.13'teki eğrisi elde edilen sistem ile aynı olmasıdır. k parametresinin değişmesi çeşitleme derecesini etkilememiştir. Çeşitleme derecesini belirleyen sistemin kullandığı kanal katsayılarının çeşitliliğidir.

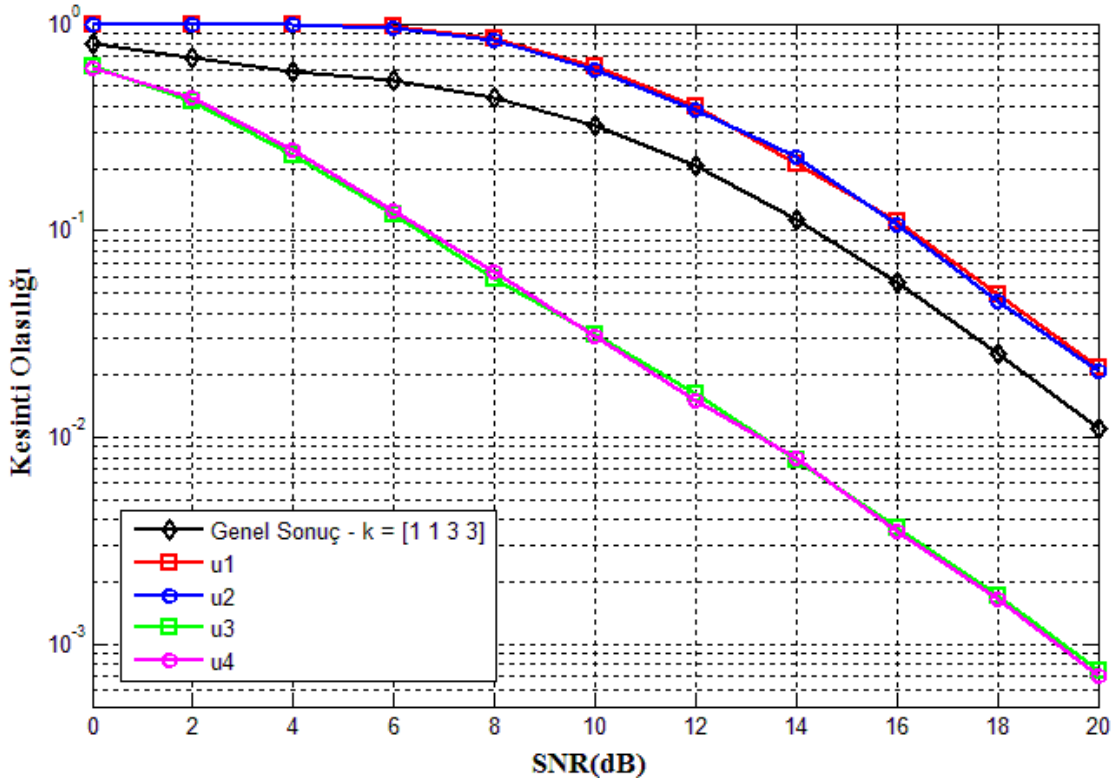
Şekil 5.21'de üçüncü ve dördüncü kullanıcıya üç adet alt-taşıyıcı ataması yapılmaktadır. Burada elde edilen sonuç, bu kullanıcılara iki adet alt-taşıyıcı ataması yapıldığında elde edilen sonuç ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, birinci kullanıcıya bir adet, ikinci ve üçüncü kullanıcıya ikişer adet ve dördüncü kullanıcıya bir adet alt-taşıyıcı ataması yapıldığında elde edilen sonuç da şekilde gösterilmektedir. $k = [3\ 2\ 2\ 1]$ durumu için elde edilen kesinti olasılığı, $k = [1\ 1\ 2\ 2]$ ve $k = [1\ 1\ 3\ 3]$ için elde edilen kesinti olasılığına göre daha küçüktür.

Sonuçlardan görüldüğü gibi belli bir kullanıcı için atama yapılan alt-taşıyıcı sayısını artırıp diğer kullanıcılar için atama yapılan alt-taşıyıcı sayısını sabit tutmak kesinti olasılığına fazla bir etki etmemektedir. Kesinti olasılığına asıl etki eden mümkün olduğunca çok kullanıcıya birden fazla alt-taşıyıcı atamaktır.



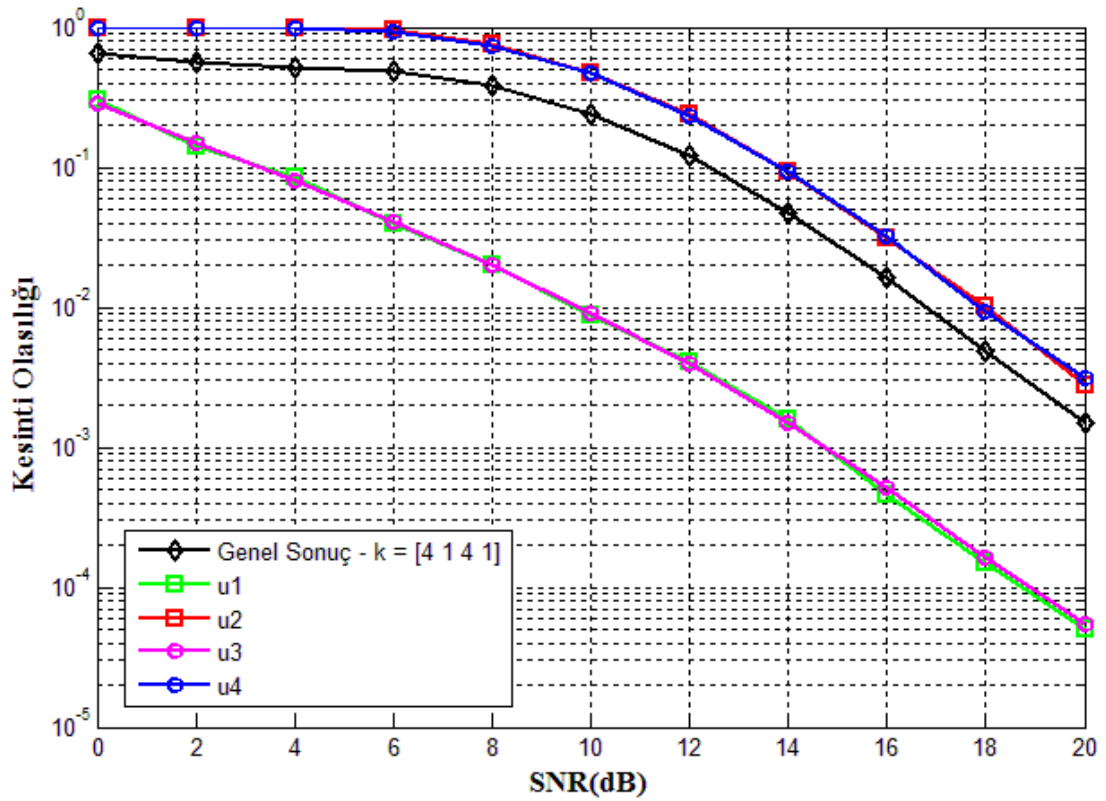
Şekil 5.21 : $M = 4, N = 8, L = 2$ için $k = [1\ 1\ 2\ 2]$, $k = [1\ 1\ 3\ 3]$, $k = [3\ 2\ 2\ 1]$ ve $k = 2$ durumlarında Rayleigh kanaldaki ortalama kesinti olasılıkları.

Şekil 5.22’de ve Şekil 5.23’te kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı atanması durumunda her bir kullanıcı için ayrı ayrı kesinti olasılıklarının eğrileri gösterilmektedir. Şekil 5.22’de, $k = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ durumu için her bir kullanıcının kesinti olasılığı eğrileri yer almaktadır. Yalnızca bir adet alt-taşıyıcı ataması yapılan birinci ve ikinci kullanıcılar en kötü performansı vermektedirler. Üçer adet alt-taşıyıcı ataması yapılan üçüncü ve dördüncü kullanıcılar ise birinci ve ikinci kullanıcıya göre çok daha iyi performans göstermektedirler.



Şekil 5.22 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ durumu için Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı eğrileri.

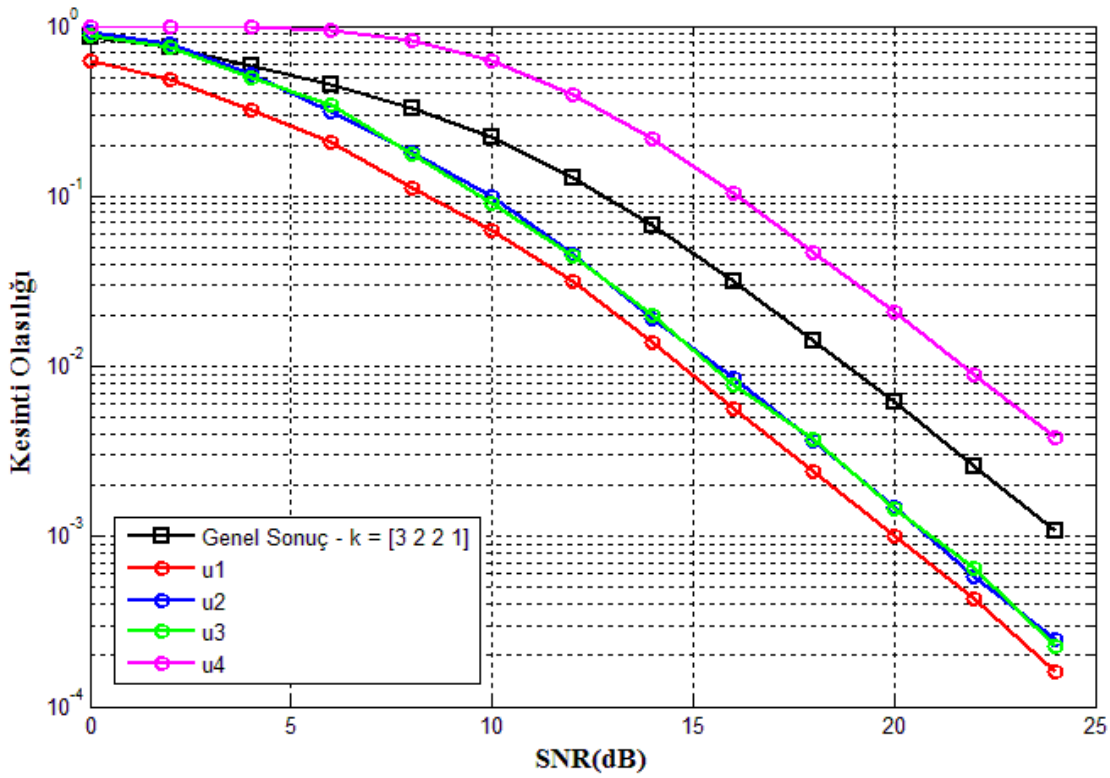
Siyah renkli eğri ile gösterilen sistemin genel kesinti olasılığına bakıldığında, yalnızca bir adet alt-taşıyıcı ataması yapılan birinci ve ikinci kullanıcıların performansının, sistemin genel performansına daha yakın olduğu görülmektedir. Buradan, sistemin genel performansının belirlenmesinde yalnızca bir adet alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcıların baskın olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.23 : $M = 4$ ve $N = 12$ ve $L = 3$ için $k = [4 \ 1 \ 4 \ 1]$ durumunda Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı eğrileri.

Şekil 5.23'te dört kullanıcı ve on iki alt-taşıyıcı bir sistemde $k = [4 \ 1 \ 4 \ 1]$ durumu için sistemin genel kesinti olasılığı ve kullanıcı başına kesinti olasılığı eğrileri verilmektedir. Burada da, dört adet alt-taşıyıcı ataması yapılan birinci ve üçüncü kullanıcıların performansının oldukça iyi olmasına rağmen tek bir kullanıcı ataması yapılmış olan ikinci ve dördüncü kullanıcıların sistemin genel performansını belirlemede baskın oldukları görülmektedir.

Şekil 5.24'te dört kullanıcı sekiz alt-taşıyıcı bir sistemde $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ durumu için sistemin genel kesinti olasılığı ve kullanıcı başına elde edilen kesinti olasılığı eğrileri verilmiştir. Üç adet alt-taşıyıcı ataması yapılan birinci kullanıcı en iyi performansı vermektedir. Önceki sonuçlarda olduğu gibi burada da yalnızca bir adet alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcı en kötü performansı vermektedir. Birinci, ikinci ve üçüncü kullanıcıların performansları sistemin genel performansından daha iyi olmasına rağmen dördüncü kullanıcının, tek başına sistemin genel performansını etkilediği görülmektedir. Kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması ile ilgili elde edilen yukarıdaki sonuçlara göre, bir kullanıcıya sadece bir adet alt-taşıyıcı atanması sistemin performansını büyük oranda kötüleştirir.



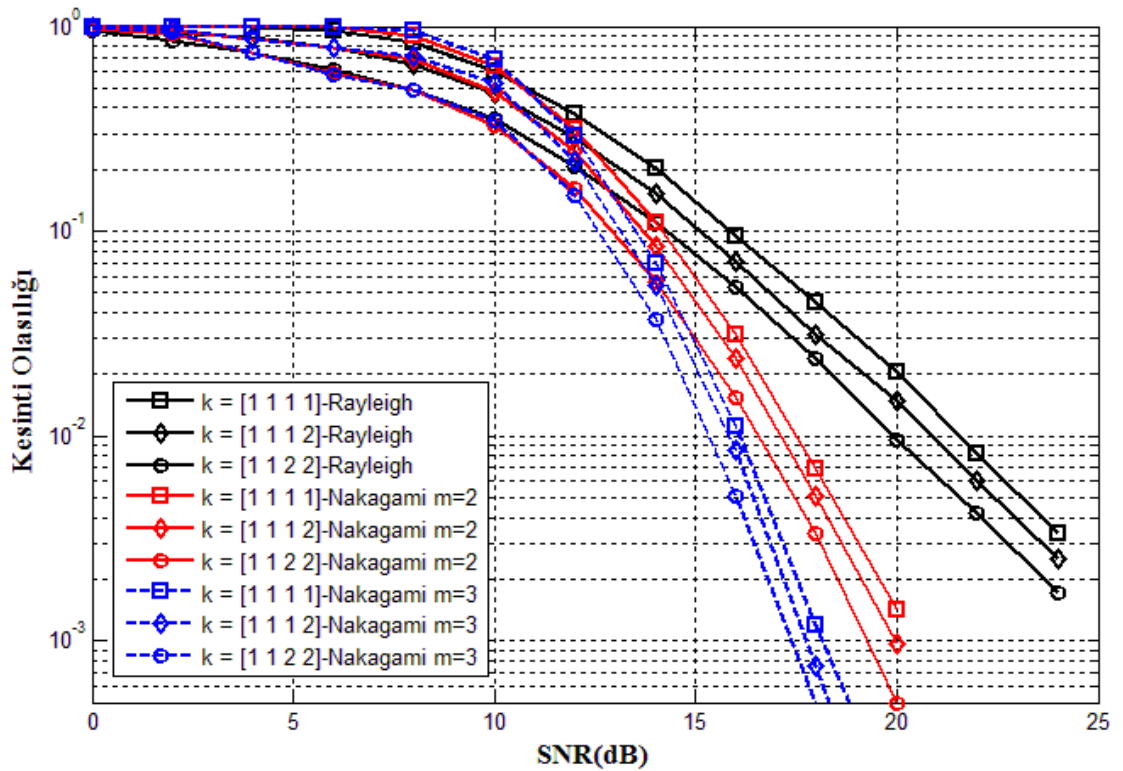
Şekil 5.24 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ durumlarında Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı eğrileri.

Elde edilen sonuçlara göre en az alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcı veya kullanıcılar her zaman diğer kullanıcılara göre daha kötü performans vermektedir. Sezgisel olarak düşünüldüğünde, daha fazla sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcıların kesinti olasılığı performansının, daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcıların kesinti olasılığı performansına göre daha kötü olması gerektiği düşünülebilir. Ancak, burada bandverimliliği R her zaman sabit kabul edilmiştir.

Yukarıdaki sonuçlar için $R = 1$ bit/sn/Hz alınmıştır. Örneğin, iki adet kullanıcı olduğu varsayalım. Tek bir alt-taşıyıcı ataması yapılan birinci kullanıcı için tek bir iletim kanalı olacaktır. İki adet alt-taşıyıcı ataması yapılan ikinci kullanıcı için ise iki adet iletim kanalı olacaktır. Birinci kullanıcının iletim kanalının toplam kapasitesi ile ikinci kullanıcının iletim yapacağı iki ayrı kanalın toplam kapasitesi eşit kabul edilmektedir. Birinci kullanıcı tek bir kanaldan belli miktardaki bir veriyi iletmeye çalışırken, ikinci kullanıcı aynı miktardaki veriyi iki ayrı kanala bölüştürerek yollayacaktır. Dolayısıyla, birinci kullanıcı için tek bir kanaldan o veriyi iletmek ikinci kullanıcıya göre daha zor olacaktır. Kullanıcılar için, ilettikleri verinin miktarı eğer iletim kanallarının kapasitelerinden fazlaysa iletim gerçekleşemeyecektir ve

kesinti durumu oluşacaktır. Bu nedenle, tek bir alt-taşıyıcı ataması yapılan birinci kullanıcının kesintide kalma olasılığı, iki adet alt-taşıyıcı ataması yapılan ikinci kullanıcıya göre daha fazla olmaktadır.

Rayleigh sönümlemeli kanallarda kullanıcı başına sabit bandverimliliği vaad edilmesi durumundaki kesinti olasılığı sonuçları farklı senaryolar için bir önceki kısımda elde edilmiştir. Bu kısımda ise bir önceki kısımda ele alınan senaryolar için Nakagami-m sönümlemeli kanallarda kullanıcı başına sabit bandverimliliği, $R = 1$ bit/sn/Hz vaad edilmesi durumunda kullanıcılara farklı sayılarda alt-taşıyıcı atama ile ilgili kesinti olasılığı sonuçları incelenmektedir. Şekil 5.25'te $M = 4$, $N = 8$ olmak üzere Şekil 5.20'deki senaryoda ele alınan $k = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$, $k = [1 \ 1 \ 1 \ 2]$ ve $k = [1 \ 1 \ 2 \ 2]$ durumları için Nakagami-m sönümlemeli kanaldaki performanslar incelenmiştir.

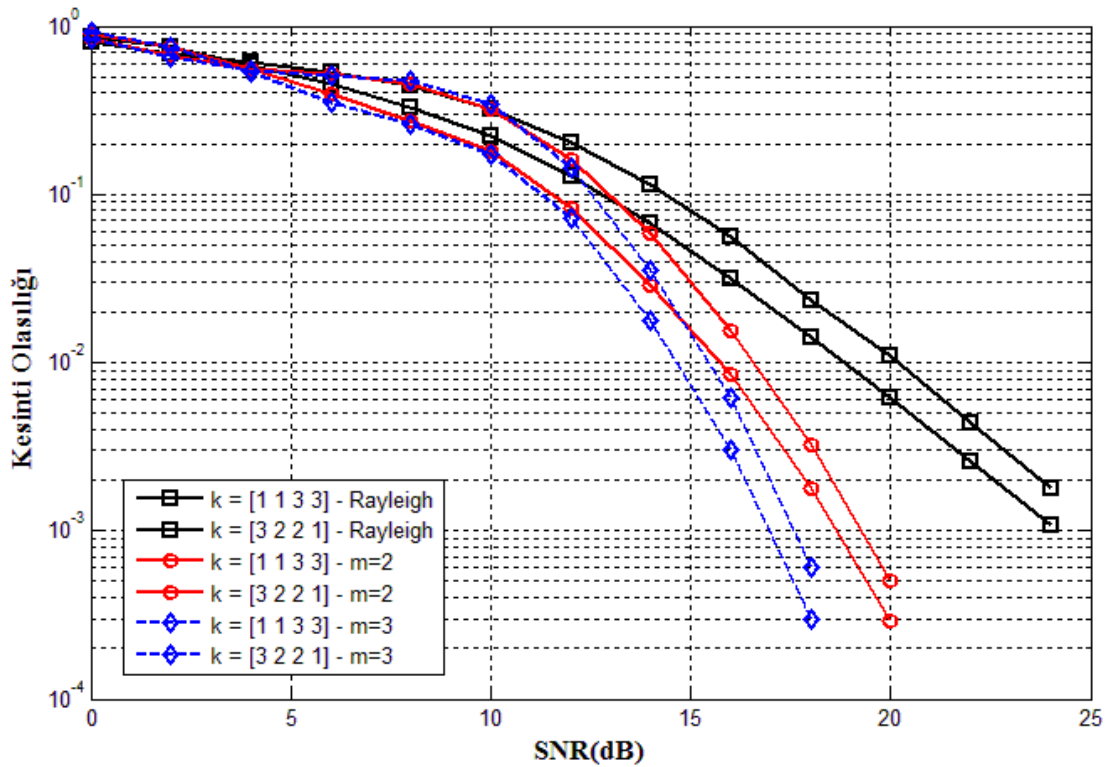


Şekil 5.25 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$, $k = [1 \ 1 \ 1 \ 2]$ ve $k = [1 \ 1 \ 2 \ 2]$ durumlarında Nakagami-m kanaldaki ortalama kesinti olasılığı.

Nakagami parametresi $m = 2$ için elde edilen sonuç ve $m = 3$ için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında performansların oldukça iyileştiği ve çeşitleme derecesinin m parametresine bağlı olarak aynı oranda arttığı görülmektedir. Rayleigh

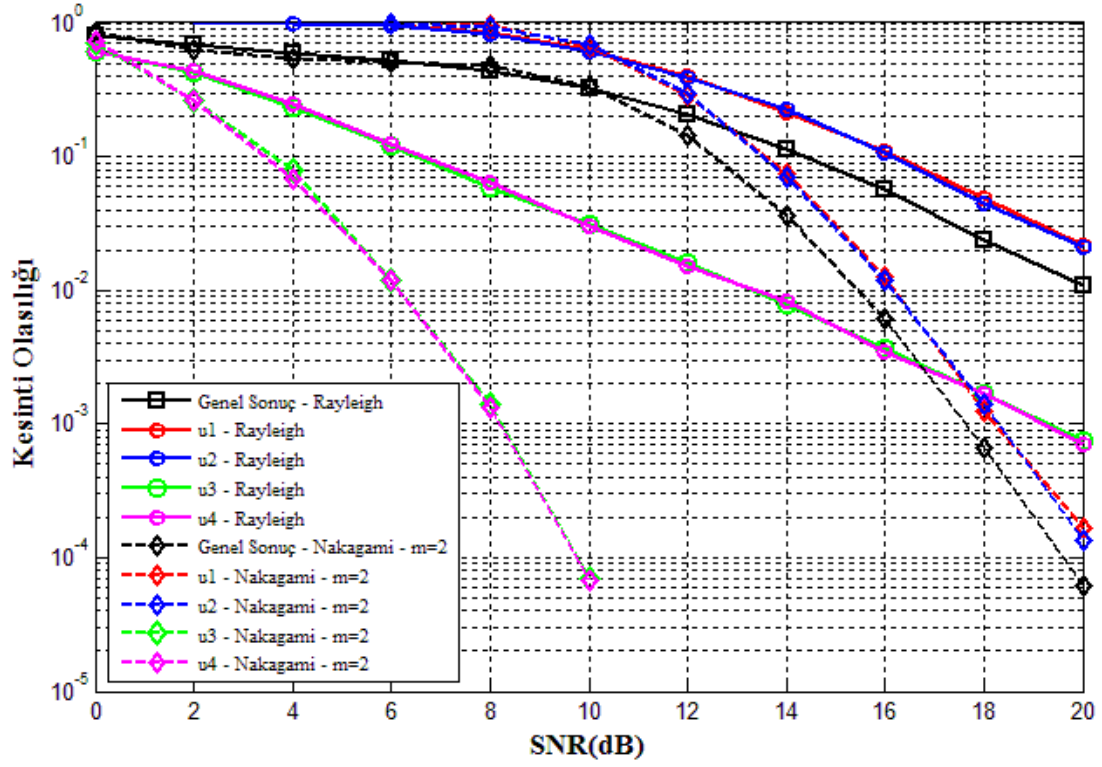
sonuçları için çeşitleme derecesi iki iken, $m = 2$ durumunda çeşitleme derecesi dört, $m = 3$ durumunda ise çeşitleme derecesi altıdır.

Şekil 5.26'da, Şekil 5.21'de Rayleigh kanallar için ele alınan senaryo ile aynı senaryonun Nakagami-m sönümlmeli kanallardaki performansı incelenmektedir. Aynı şekilde burada da uyumluluk bandgenişliği sayısı $L = 2$ olduğundan çeşitleme derecesi Rayleigh kanallarda aynı kalmaktadır. Nakagami-m kanallar için ise çeşitleme derecesi m parametresine bağlı olarak artmaktadır.

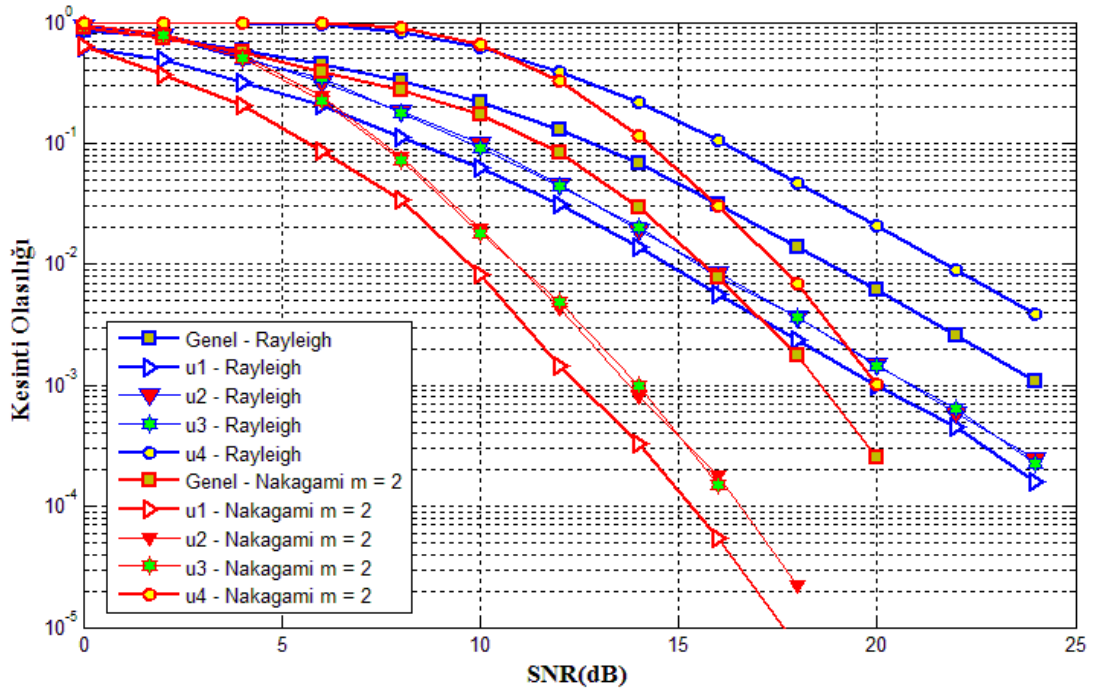


Şekil 5.26 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1\ 1\ 3\ 3]$ ve $k = [3\ 2\ 2\ 1]$ durumlarında Rayleigh ve Nakagami-m kanaldaki ortalama kesinti olasılığı.

Şekil 5.27'de, Şekil 5.22'deki senaryo için Nakagami-m kanaldaki performanslar incelenmektedir. Şekil 5.28'de ise, Şekil 5.23'teki senaryo için Nakagami sönümlmeli kanaldaki kesinti olasılıkları incelenmektedir. Kullanıcıların ayrı ayrı kesinti olasılıkları için farklı m parametrelerine bağlı olarak sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca genel kesinti olasılığı sonuçları ile kullanıcı başına kesinti olasılığı sonuçları da karşılaştırılmaktadır.



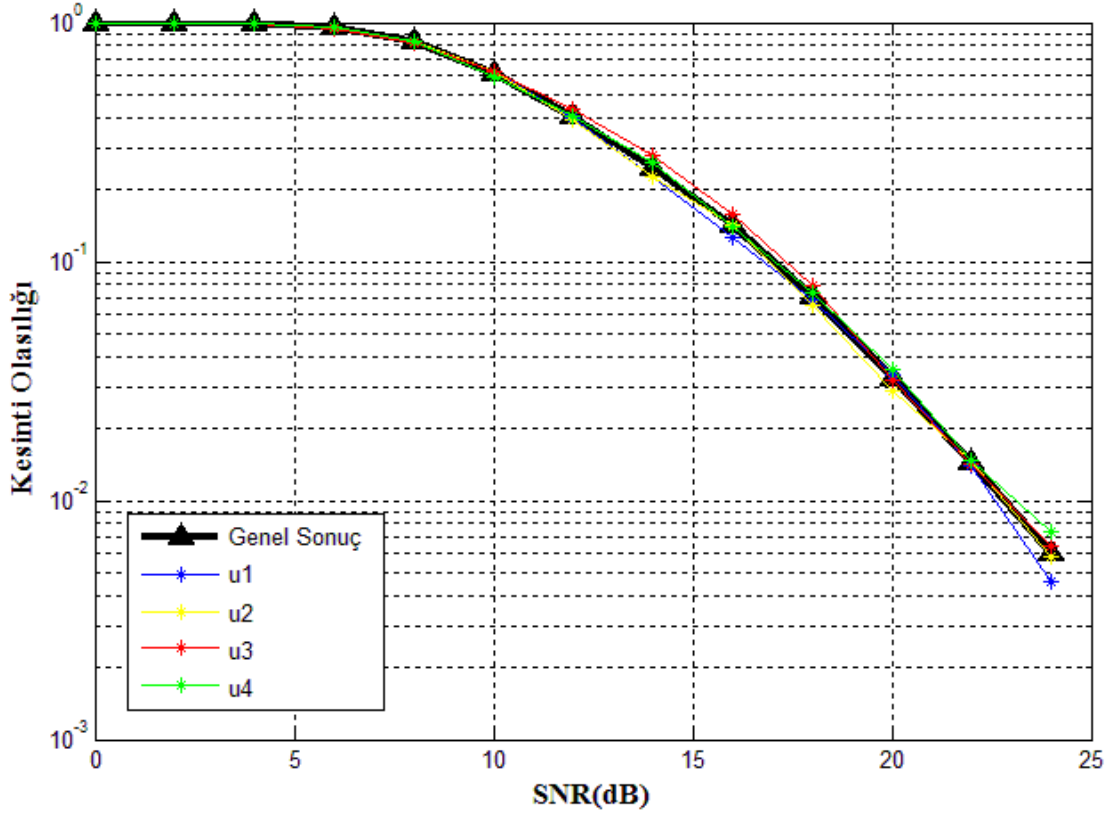
Şekil 5.27 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1 1 3 3]$ durumunda Nakagami- m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı.



Şekil 5.28 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 2 2 1]$ durumunda Nakagami kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı.

5.5 Kullanıcı Başına Değişen Bandverimliliği ile İlgili Rayleigh ve Nakagami-m Sönümlmeli Kanallardaki Benzetim Sonuçları

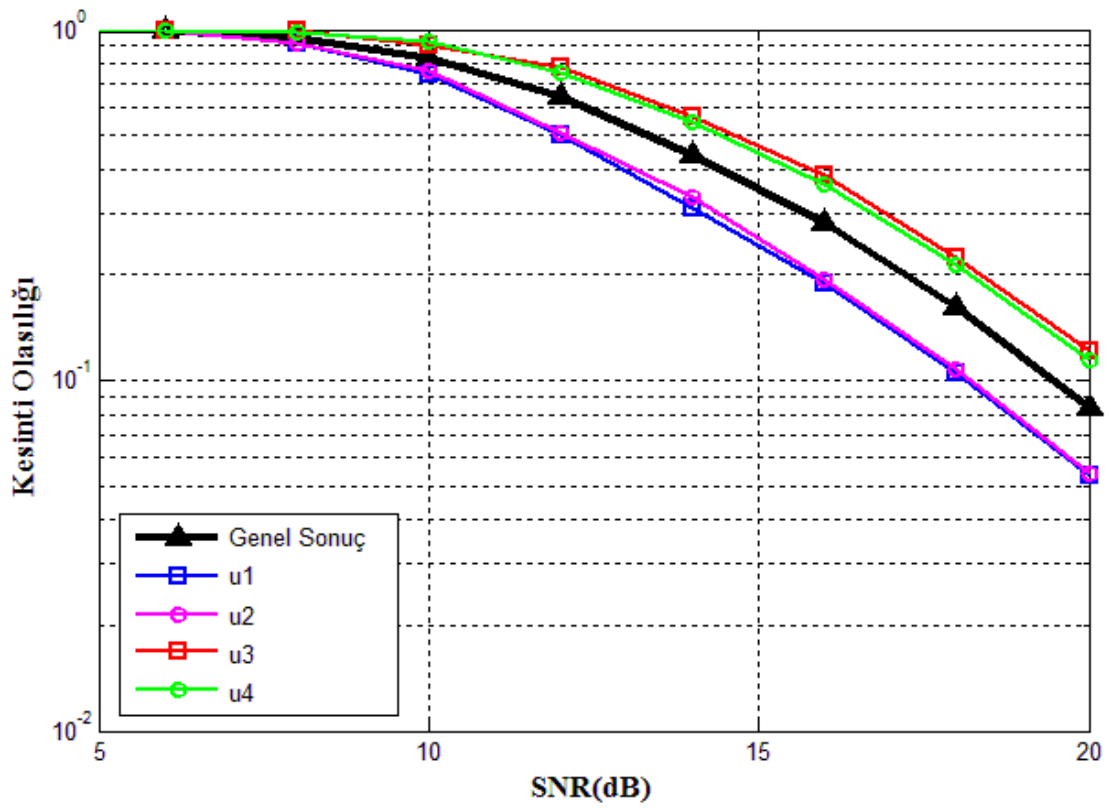
Kullanıcı başına değişen bandverimliliği ile ilgili ele alınan senaryoların ilkinde kullanıcılara vaad edilen bandverimliliği, atanacak olan alt-taşıyıcı sayısı ile orantılı olarak varsayılın. Bu senaryoya ilişkin bir örnek olarak, $k = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ ve $R = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ durumlarındaki sonuçlar Şekil 5.29'da gösterilmektedir.



Şekil 5.29 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ durumunda Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı.

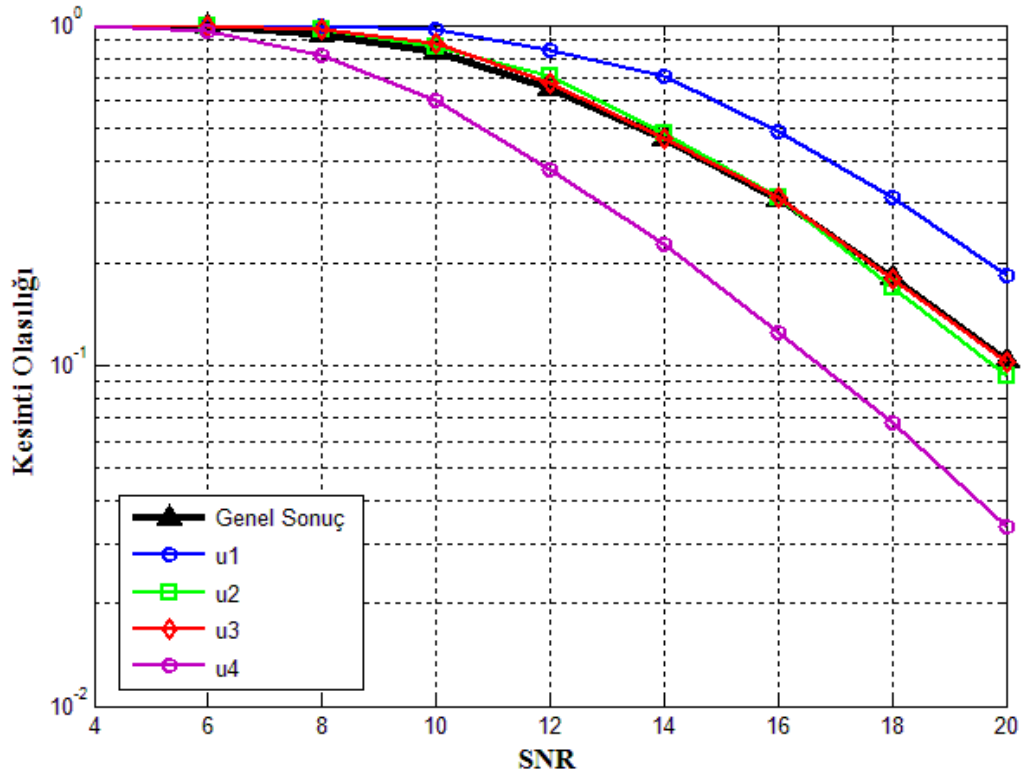
Şekilden görüldüğü gibi, tüm kullanıcıların kesinti olasılıkları aynıdır. Bunun sebebi, her kullanıcıya vaad edilen bandverimliliğinin, atanan alt-taşıyıcı sayısı ile orantılı olarak belirlenmesidir. Bir alt-taşıyıcı ataması yapılan bir kullanıcı, tek bir iletim kanalından X miktardaki veriyi iletir. Üç adet alt-taşıyıcı ataması yapılan bir kullanıcı da üç ayrı iletim kanalından toplamda $3X$ miktardaki veriyi iletecektir; yani bu kullanıcı için her bir iletim kanalı başına X miktar veri iletimi yapılacaktır. Bu açıdan düşünüldüğünde iki kullanıcı için de durum aynıdır. Bu yüzden, bir adet alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcı ve üç adet alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcı için kesinti olasılıkları da aynı olmaktadır. $k = 2$ için çizilen eğri (Şekil 4.13) ile

yukarıdaki sonuçlar karşılaştırıldığında $k = 2$ için bulunan sonucun daha iyi performans verdiği görülmektedir. Çünkü bu durumda tüm kullanıcılar için adalet kriteri geçerlidir. Her kullanıcıya aynı sayıda alt-taşıyıcı atanmaktadır. $k = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ için ele alınan kullanıcılar için ise adalet kriteri sağlanmamaktadır. Çünkü buradaki amaç, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre vaad edilecek bandverimliliğini belirleyerek ve alt-taşıyıcı ataması yaparak iletilecek verileri en uygun şekilde iletebilmektedir. Şekil 5.30'da $k = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ ve $R = [1.1, 1.1, 3.8, 3.8]$ durumları için kullanıcı başına kesinti olasılığı sonuçları gösterilmektedir. Burada genel kesinti olasılığı, kullanıcı kesinti olasılıklarından (5.5)'deki gibi hesaplanmaktadır.

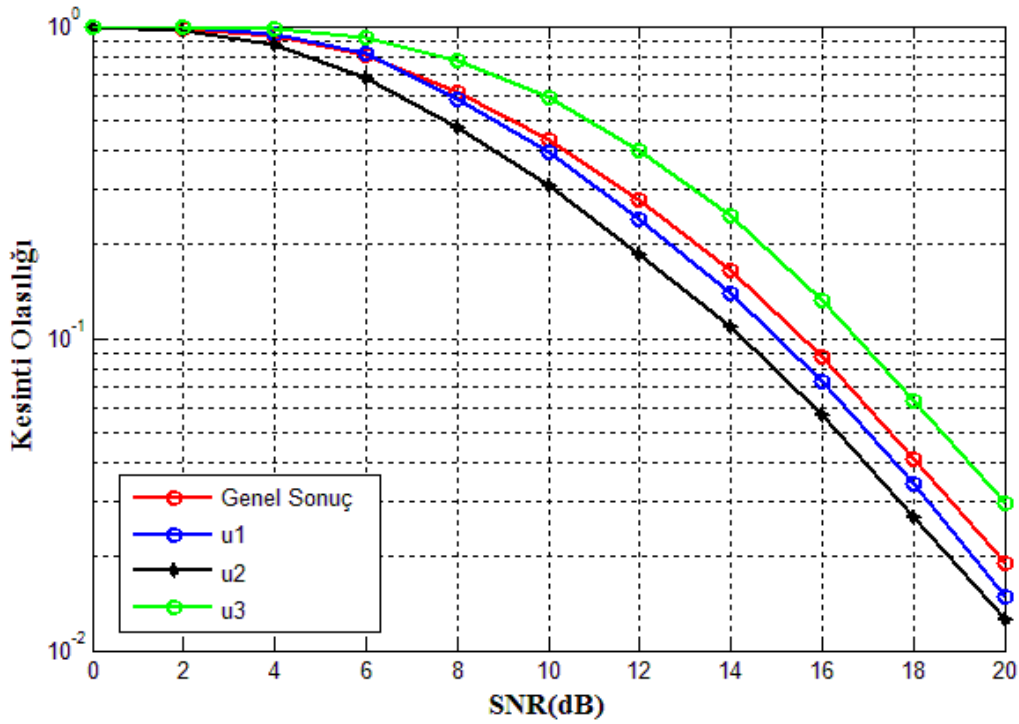


Şekil 5.30 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ ve $R = [1.1, 1.1, 3.8, 3.8]$ durumunda Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı.

Şekil 5.31'de ise $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ ve $R = [4, 2.4, 2.4, 1]$ ve Şekil 5.32'de $k = [2 \ 1 \ 3]$ ve $R = [2.2, 1, 3.8]$ durumları için kullanıcı başına kesinti olasılığı sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 5.31 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ ve $R = [4, 2.4, 2.4, 1]$ durumunda Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı.

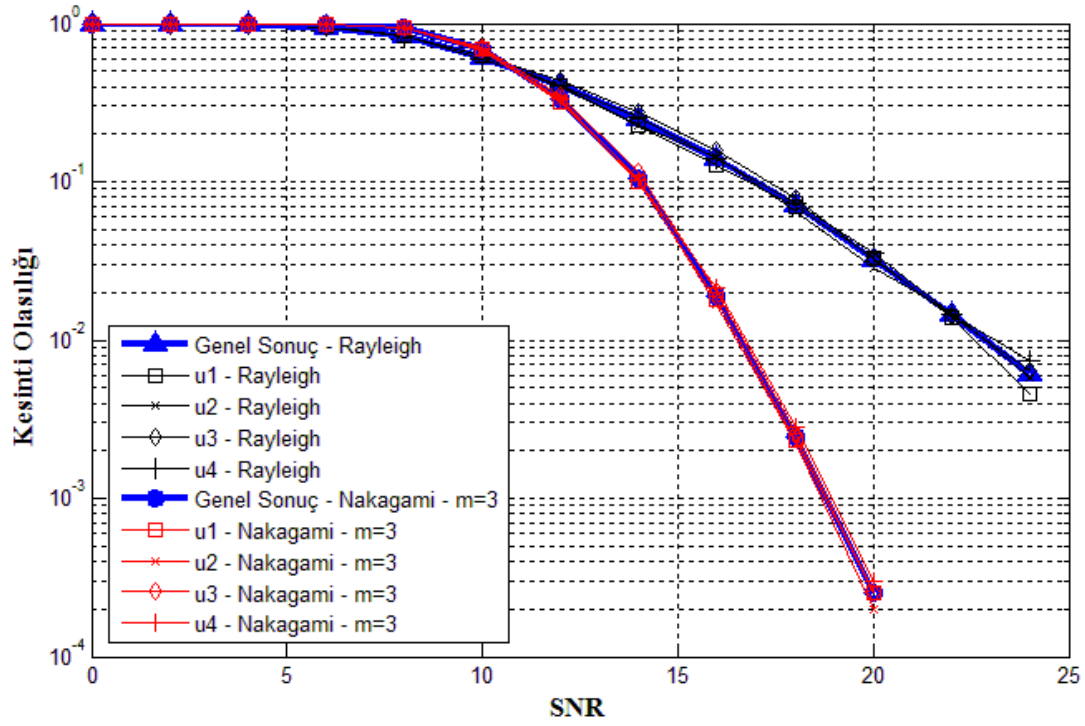


Şekil 5.32 : $M = 3$ ve $N = 6$ ve $L = 2$ için $k = [2 \ 1 \ 3]$ ve $R = [2.2, 1, 3.8]$ durumunda Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı.

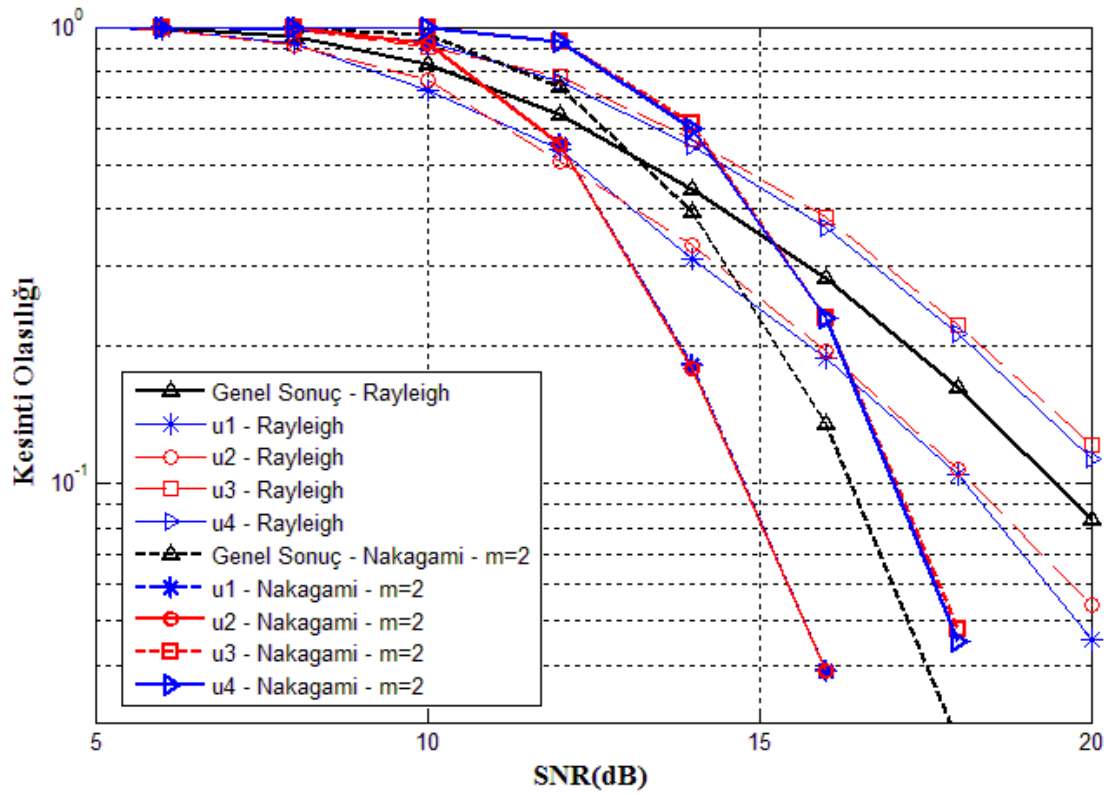
Şekil 5.30 , Şekil 5.31 ve Şekil 5.32’den görülebileceği gibi daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcılar daha iyi performans göstermektedir. Burada, daha fazla sayıda alt-taşıyıcı atanmış kullanıcılar için iletim kanalı başına daha yüksek iletim oranı şart koşulmuştur. Bu durumda, daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcıların kullanacağı iletim kanalındaki sağlanması gereken iletim oranı, daha fazla sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcılara nispeten daha az olmaktadır. Böylece daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcıların kesintide kalma olasılıkları da daha az olmaktadır. Başka bir deyişle bu durumda, daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcılar diğerlerinden daha iyi performans göstermektedirler.

Rayleigh sönümlmeli kanallarda kullanıcı başına değişen bandverimliliği vaad edilmesi durumundaki kesinti olasılığı sonuçları farklı senaryolar için bir önceki kısımda elde edilmiştir. Bu kısımda ise bir önceki kısımda ele alınan senaryolar için Nakagami-m sönümlmeli kanallarda kullanıcı başına değişen bandverimliliği vaad edilmesi durumunda kullanıcılara farklı sayılarda alt-taşıyıcı atama ile ilgili kesinti olasılığı sonuçları incelenmektedir.

Şekil 5.33’te $M = 4$, $N = 8$ olmak üzere Şekil 5.29’daki senaryoda ele alınan $k = [1\ 1\ 3\ 3]$ durumu için kullanıcı başına karşılanması gereken bandverimliliği vektörü $R = [1\ 1\ 3\ 3]$ olarak alınması durumunda Nakagami-m sönümlmeli kanaldaki performanslar incelenmiştir. $m = 3$ için çizilen Nakagami-m kanaldaki eğriye bakılırsa, performansın oldukça iyileştiği görülmektedir. Bu sistem için, Rayleigh kanalda performans oldukça kötüdür. Performansı iyileştirmek için atanacak alt-taşıyıcı sayısı artırılmalı veya karşılanması gereken iletim hızı kötü performans veren kullanıcılar için azaltılmalıdır.

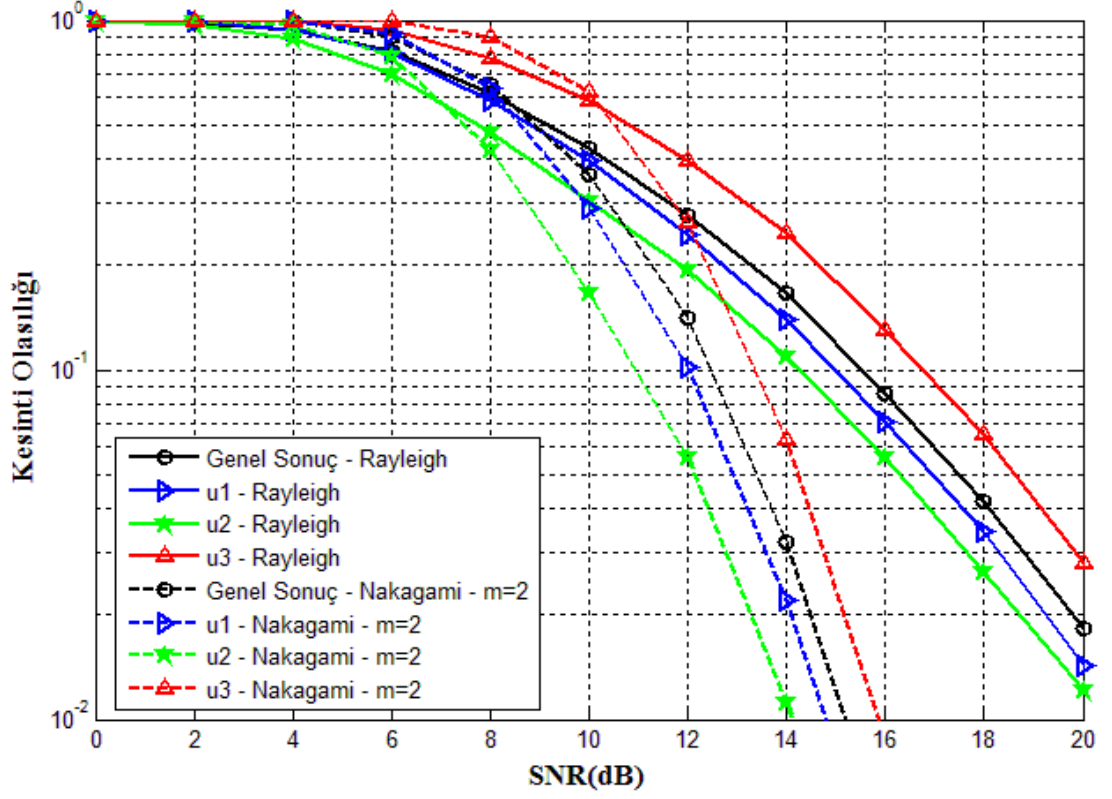


Şekil 5.33 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ ve $R = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ durumunda Nakagami- m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı.



Şekil 5.34 : $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [1 \ 1 \ 3 \ 3]$ ve $R = [1.1, 1.1, 3.8, 3.8]$ durumunda Nakagami- m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı.

Şekil 5.34'te, Şekil 5.30'daki senaryoya ilişkin Nakagami-m kanaldaki sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 5.35'te ise Şekil 5.32'deki senaryoya ilişkin Nakagami-m kanaldaki sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 5.35 : $M = 3$ ve $N = 6$ ve $L = 2$ için $k = [2 \ 3 \ 1]$ ve $R = [2.2, 1, 3.8]$ durumunda Nakagami-m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılığı.

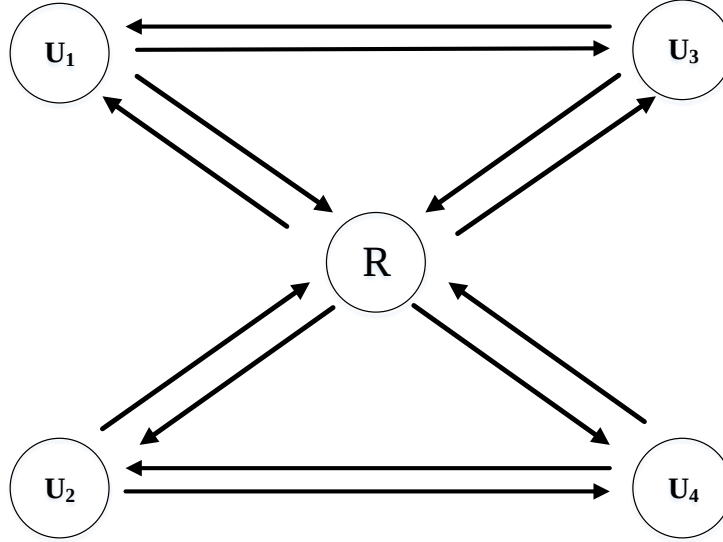
6. AĞ KODLAMALI OFDMA SİSTEMLERİNDE ALT-TAŞIYICI ATAMA

6.1 Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemi Tanımı

Klasik OFDMA sistemlerde, alt-taşıyıcı ataması yapılırken tek bir BS ve bir grup gezgin kullanıcının olduğu varsayılmaktadır. Bu bölümde ise daha çok ileri nesil telsiz iletişim sistemlerine yönelik olarak ağ kodlamanın da yapıldığı OFDMA sistemler için rastgele diyagramlar kullanılarak optimum şekilde alt-taşıyıcı ataması yapılması ele alınmaktadır. Ağ kodlamalı bir OFDMA sisteminde, klasik OFDMA sisteminden farklı olarak, röle ($\mathcal{R}$) adı verilen bir birim çift yönlü iletişime yardım etmektedir. Genel biçimiyle düşünüldüğünde röle, bir BS olabileceği gibi, BS'ten daha az fonksiyona sahip küçük bir birim, hatta başka bir kullanıcı bile olabilir. Dahası, rölelerin sayısı birden fazla da olabilir. Bu tezde ele alınan sistemde, bir adet röle ve bir grup gezgin kullanıcı bulunduğu varsayılmaktadır. [24]'de verilen çoklu röle içeren ağ kodlamalı sistem modelinin tek röleli hali, dört kullanıcı için Şekil 6.1'de rastgele ağ kodlamalı OFDMA sistemine ait bir model olarak gösterilmektedir. Burada ele alınan sistem modelinde, iki yönlü iletim yapan farklı düğüm kümesi bulunmaktadır. Şekilde gösterilen kullanıcıların her biri hem kaynak ($\mathcal{S}$) hem de hedef ($\mathcal{D}$) durumundadır.

Kullanıcılar, veri iletecekleri zaman bu veriyi iki ayrı kanal üzerinden iletebilmektedirler. Bu iletim kanallarından biri, kaynak-hedef arasındaki doğrudan kanal ($\mathcal{S} - \mathcal{D}$), diğeri ise kaynak-röle-hedef arasındaki kanaldır ($\mathcal{S} - \mathcal{R} - \mathcal{D}$). Burada iletim iki yönlü olarak gerçekleştirilmektedir. İki yönlü iletim yapan sistemlerde veri iletimi yayım fazı ve aktarım fazı olmak üzere iki fazda gerçekleşmektedir. Yayım fazında bütün kullanıcılar kendilerine atanmış olan OFDMA alt-taşıyıcılarının seçimini sistem başarımını optimize ederek sağlarlar ve bu şekilde veri iletimi yaparlar. İletilen işaretler, hem röle düğümü tarafından hem de hedef düğümler tarafından alınır. Bu aşamada ağ kodlama yapılmamaktadır. İkinci faz olan aktarım fazında ise röle birimleri öncelikli olarak kaynaktan alınan işaretleri çözerler. Bu

özölen işareler rastgele ağ kodlama katsayıları ile kodlanır. Röle birimleri ağ kodlanmış işareleri daha sonra hedef birimlere iletirler.



Şekil 6.1: Ağ kodlamalı sistem modeli.

Bu bölümde, yukarıda açıklanan ağ kodlamalı OFDMA sistem modelindeki kullanıcılara $\mathcal{H}$ -eşleme tabanlı alt-taşıyıcı atama algoritması ile alt-taşıyıcı ataması yapılması önerilmektedir. Kullanıcılara alt-taşıyıcı ataması yayım fazında yapılmaktadır. Bu nedenle, bu bölümde elde edilen yeni sonuçlar için sadece yayım fazı göz önünde bulundurulmaktadır.

Kaynak durumundaki kullanıcılar iletim yapacakları zaman, verileri kaynak-hedef arasındaki $\mathcal{S} - D$ kanalından doğrudan ya da kaynak-röle-hedef arasındaki $\mathcal{S} - \mathcal{R} - D$ kanalından iletebilmektedirler. Bu durumda kullanıcıların iletim yapması için iki ayrı alternatif yol bulunmaktadır. Bu çeşit bir sistem modeli için ikili hiperdiyagram eşleme problemi oluşturulabilmektedir. Yukarıda bahsedilen tek röleli sistem modeli için kullanıcı sayısı $M = 4$ ve alt-taşıyıcı sayısı $N = 8$ için oluşturulan diyagram yapısı Şekil 6.2’de gösterilmektedir. U_1, U_2, U_3, U_4 iletim yapan kullanıcı düğümlerini göstermektedir. İletim yapan düğümler ile alt-taşıyıcıları bağlayan ikili yollar bulunmaktadır. Bu yollardan birisi kaynak ve hedef arasındaki doğrudan iletim kanalını (örneğin $[h_1]_{11}$), ikinci kanal ise kaynak birimle röle arasındaki iletim kanalını göstermektedir (örneğin $[h_1]_{12}$). Diyagramda en üst kolda $[h_1]_{11}$ ifadesindeki son indis (1) U_3 kullanıcısını, $[h_1]_{12}$ ifadesindeki son indis (2) röleyi

göstermektedir. Diyagram yoluyla alt-taşıyıcı atamasını daha kolay gösterebilmek amacıyla, Bölüm 3'te olduğu gibi, taşıyıcıları da içeren bir diyagram kullanılmıştır. Kullanıcılar ile alt-taşıyıcılar arasında birden fazla bağlantı olabilmesi nedeniyle oluşturulan diyagram bir ikili hiperdiyagram olarak adlandırılmaktadır. En genel durumda, M kullanıcı sayısı, N alt-taşıyıcı sayısı ve $m = 1, 2, \dots, M$, $n = 1, 2, \dots, N$ olmak üzere, kaynak ile hedef arasındaki bağlantı, eşik değerin aşılması; yani

$$|[h_m]_{n1}|^2 \geq \frac{2^{\frac{R}{K}N_c-1}}{SNR} \text{ olması durumunda sağlanmaktadır. Kaynak röle arasındaki}$$

$$\text{bağlantı ise } |[h_m]_{n2}|^2 \geq \frac{2^{\frac{R}{K}N_c-1}}{SNR} \text{ olması durumunda olmaktadır. Burada } j = 1, 2$$

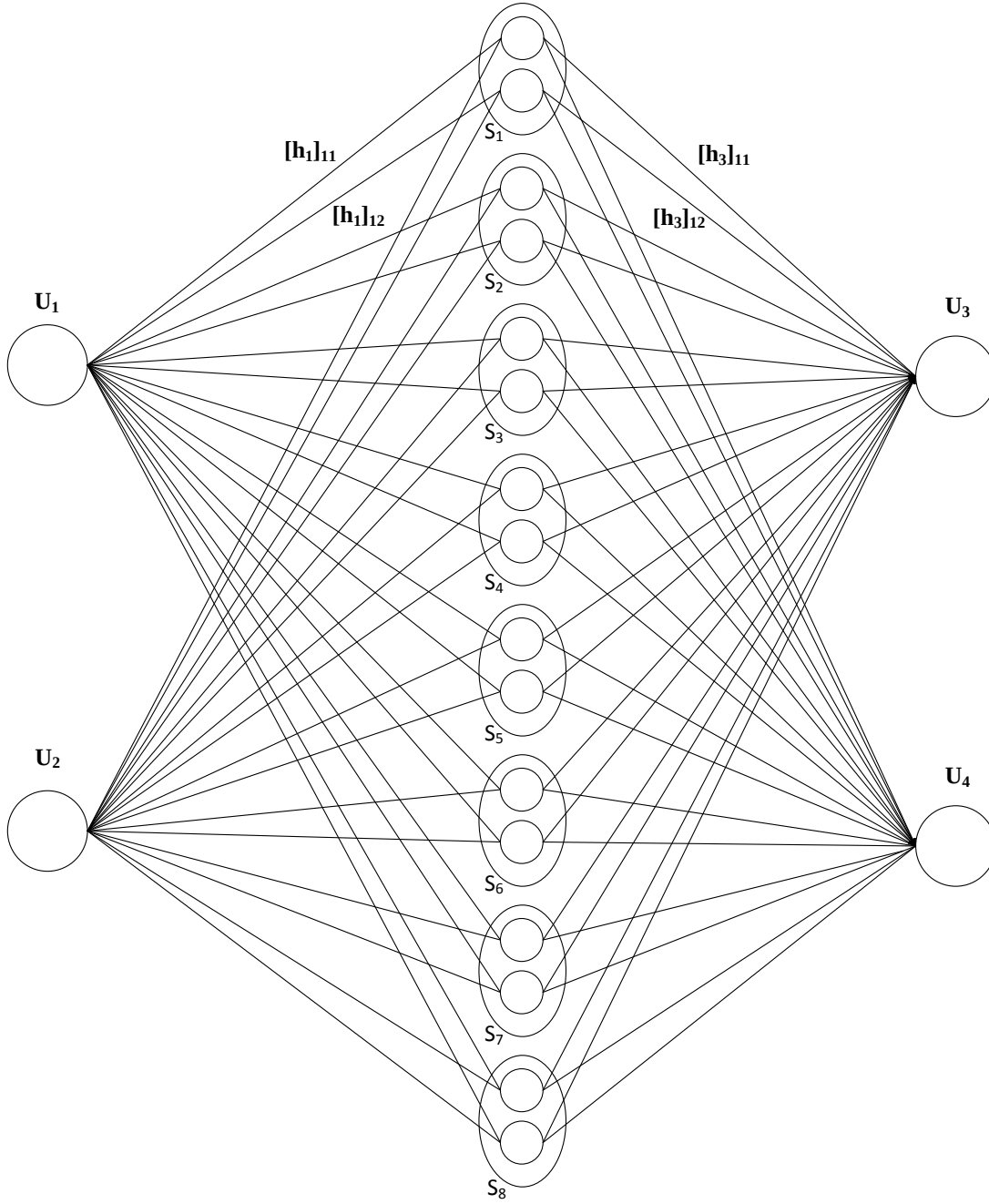
olmak üzere nj , bir kullanıcının belli bir alt-taşıyıcı ile $\mathcal{S} - D$ ($j = 1$ için) ve $\mathcal{S} - \mathcal{R} - D$ ($j = 2$ için) kanallarında olan bağlantılarını belirtmektedir. Buradaki eşik

değer $a_{th} = \frac{2^{\frac{R}{K}N_c-1}}{SNR}$ ile gösterilsin. Bu diyagram yapısı denk kaynak-röle-hedef kanallarının aşağıdaki biçimde tanımlanmasıyla,

$$[h_m]_{eq,n1,n2} = \begin{cases} [h_m]_{eq,n1} & , |[h_m]_{n1}|^2 \geq a_{th} \text{ ve } |[h_m]_{n2}|^2 \leq a_{th} \\ [h_m]_{eq,n2} & , |[h_m]_{n1}|^2 \leq a_{th} \text{ ve } |[h_m]_{n2}|^2 \geq a_{th} \\ \max([h_m]_{eq,n1}, [h_m]_{eq,n2}) & , |[h_m]_{n1}|^2 \geq a_{th} \text{ ve } |[h_m]_{n2}|^2 \geq a_{th} \end{cases} \quad (6.1)$$

Şekil 4.3'teki diyagram yapısına dönüştürülebilmektedir. Elde edilen denk kanallar üzerinden $\mathcal{H}$ -eşleme algoritması kullanılarak alt-taşıyıcı ataması kesinti olasılığını en aza indirgeyecek şekilde yapılabilmektedir.

(6.1)'e göre $\mathcal{S} - D$ kanalı için bir alt-taşıyıcı, hedef iletim oranı R 'yi karşılıyorsa (diğer bir deyişle $|[h_m]_{n1}|^2$ eşik değerin altında değilse); fakat $\mathcal{S} - \mathcal{R}$ kanalı için karşılayamıyorsa ($|[h_m]_{n2}|^2$ eşik değerin altındaysa) bu durumda iletim yapacak olan kullanıcıya $\mathcal{S} - D$ kanalında alt-taşıyıcı ataması yapılmaya çalışılacaktır. Tam tersi durumda ise, iletim yapacak olan kullanıcıya $\mathcal{S} - \mathcal{R}$ kanalında alt-taşıyıcı ataması yapılmaya çalışılmaktadır. Eğer her iki kanal için de bir alt-taşıyıcı tarafından R karşılanabiliyorsa, bu durumda iki kanaldan iyi olanı seçilir ve seçilen kanaldan alt-taşıyıcı ataması yapılır. Her iki kanal için de R , bir alt-taşıyıcı tarafından karşılanamıyorsa o alt-taşıyıcı ve kullanıcı arasında bağlantı olmamaktadır; yani kullanıcı kesintide kalmaktadır.



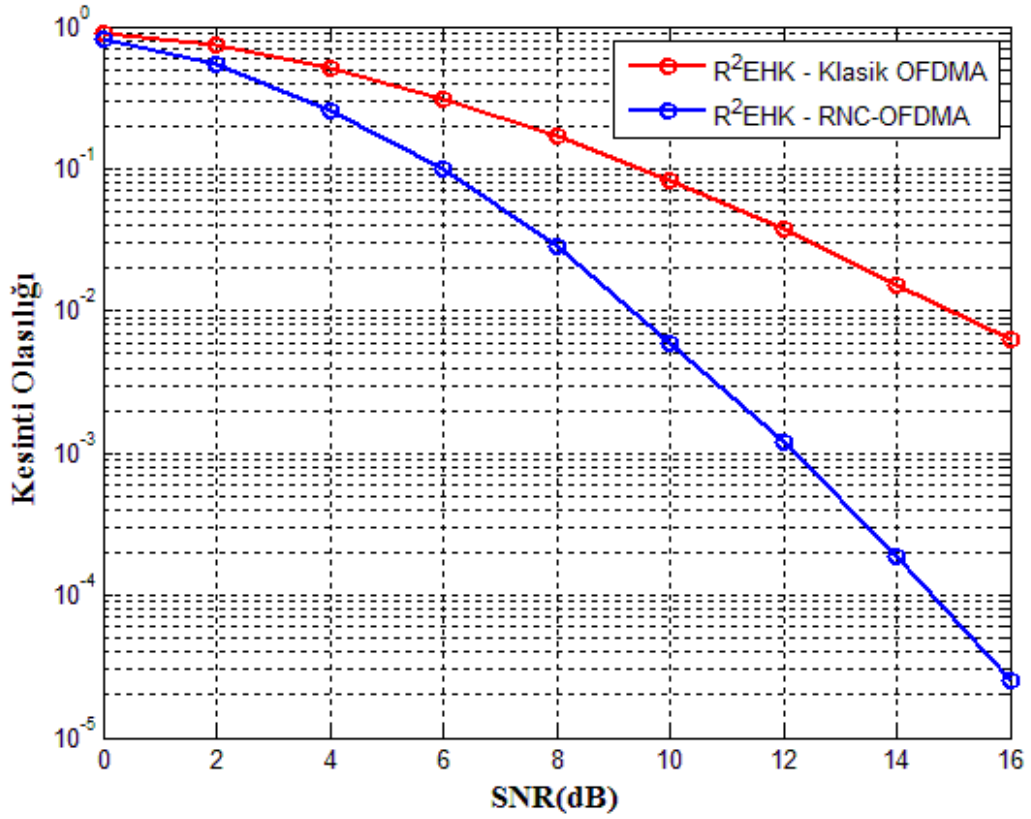
Şekil 6.2: $M = 4$ ve $N = 8$ için ikili hiperdiyagram.

6.2 R^2EHK Algoritmasına İlişkin Rayleigh ve Nakagami-m Kanallardaki Benzetim Sonuçları

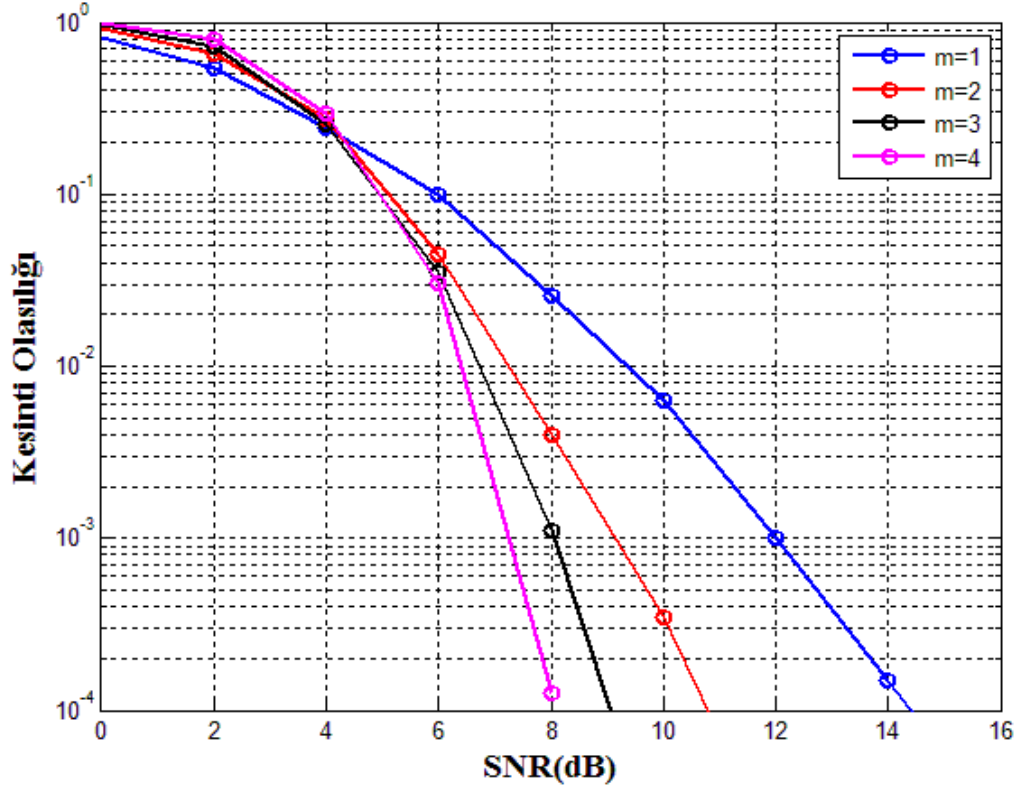
$M = 4$, $N = 8$ ve $L = 2$ parametrelerine sahip sistem için, R^2EHK algoritması kullanılarak Rayleigh sönümlmeli kanallarda bilgisayar benzetimleri ile elde edilen kullanıcı kesinti olasılığı sonuçları Şekil 6.3'te gösterilmektedir. Şekilde, klasik

OFDMA sistemdeki kesinti olasılığı ile rastgele ağ kodlamanın kullanılabileceği bir OFDMA sistemdeki kesinti olasılığı karşılaştırılmaktadır. Klasik OFDMA sistemde çeşitleme derecesi daha önce de bahsedildiği gibi 2'dir. Ağ kodlamalı OFDMA sistemde ise bir kullanıcının iletim yapabileceği kanal sayısı daha fazla olduğundan frekans çeşitlemesi de artmaktadır. Yukarıda verilen parametreler ile elde edilen sonuca göre tek röleli ağ kodlamalı bir OFDMA sistemde çeşitleme derecesi 4 olmaktadır. Böylece, klasik bir OFDMA sisteme göre çok daha iyi bir kesinti olasılığı elde edilmektedir.

Şekil 6.4'te Nakagami-m sönümlmeli kanalda elde edilen kesinti olasılığı benzetim sonuçları gösterilmektedir. Nakagami için m parametresi arttıkça çeşitleme derecesi de o oranda artmakta ve kesinti olasılığı iyileşmektedir.



Şekil 6.3: $M = 4$ ve $N = 8$ için R^2EHK algoritmasına ilişkin klasik OFDMA ve RNC-OFDMA sistemlerinin Rayleigh kanaldaki ortalama kesinti olasılıkları.



Şekil 6.4: $M = 4$ ve $N = 8$ için R^2EHK algoritmasına ilişkin RNC-OFDMA sisteminin Nakagami- m kanaldaki ortalama kesinti olasılıkları.

6.3 Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemlerde Kullanıcılara Farklı Sayılarda Alt-taşıyıcı Atama

Klasik OFDMA sistemde olduğu gibi ağ kodlamalı OFDMA sistemlerde de kullanıcılara farklı sayılarda alt-taşıyıcı ataması aynı yöntemler ile yapılabilir. Hatta, ağ kodlamalı OFDMA sistemlerinin gelecek nesil haberleşme sistemleri içerisinde yer alacağı düşünülürse, bu sistemler için kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması yapmak çok daha anlamlı olmaktadır. Çünkü ağ kodlamalı sistemlerde temel amaç bir iletişim ağı içerisindeki iletim hızını ve verimi artırmaktır. Kullanıcıların farklı ihtiyaçları doğrultusunda farklı sayılarda alt-taşıyıcı ataması yaparak verim ve hız da artmış olmaktadır. Yeni haberleşme sistemlerinde, yüksek hız ve verim elde etmenin yanı sıra kaynak ataması da büyük bir sorun teşkil ettiğinden farklı sayıda alt-taşıyıcı atamasının ağ kodlamalı OFDMA sistemler üzerindeki sonuçlarının incelenmesi oldukça önemlidir.

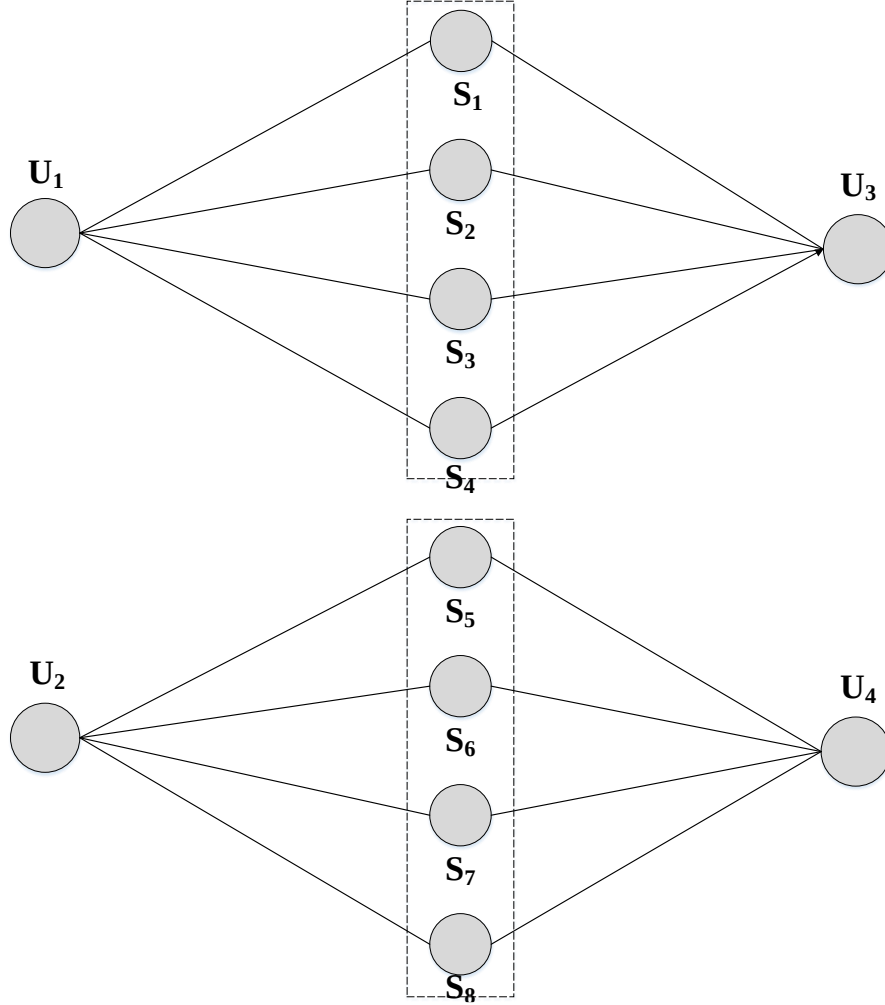
Ağ kodlamalı OFDMA sistemlerde kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılırken kullanıcı başına sabit ve değişen bandverimliliği durumları da göz önüne alınmalıdır. Ağ kodlamada, ağ içindeki kullanıcıların birbirleriyle yüksek hızlarda ve verimli bir şekilde iletişim yapmaları gerekmektedir. Bu da kaynak ataması problemiyle doğrudan ilişkilidir. Sistemdeki mevcut kaynaklar kullanıcılara optimum şekilde sağlanmalıdır. Böylece bir OFDMA sisteminde, mevcut kaynaklar bandgenişliğinden en az miktarda ödün verecek şekilde kullanılarak yüksek performans sağlanabilmektedir.

Kullanıcılara farklı sayılarda alt-taşıyıcı atama, Bölüm 5'te anlatılan şekilde yapılmaktadır. Bölüm 5'te çoğunlukla varsayıldığı üzere, bu bölümde de $M = 4$, $N = 8$ ve $L = 2$ parametrelerine sahip ağ kodlamalı OFDMA sistem modeli göz önüne alınacaktır. Buradaki sistem modeli için de farklı sayıda alt-taşıyıcı atamasına yönelik bir $k = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$ vektörü düşünülebilir. Sabit bandverimliliği durumunda (5.2)'deki koşul, değişen bandverimliliği durumunda ise (5.4)'teki koşul alt-taşıyıcıların kesintide olup olmadıklarını belirlemek için kullanılmaktadır. Sabit veya değişen bandverimliliği durumları için yine $\mathcal{H}$ -eşleme tekniğine dayalı olarak çalışan Çoklu- R^2EHK algoritması kullanılmaktadır.

6.4 Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemlerinde Çoklu- R^2EHK Algoritmasının Uygulama Adımları

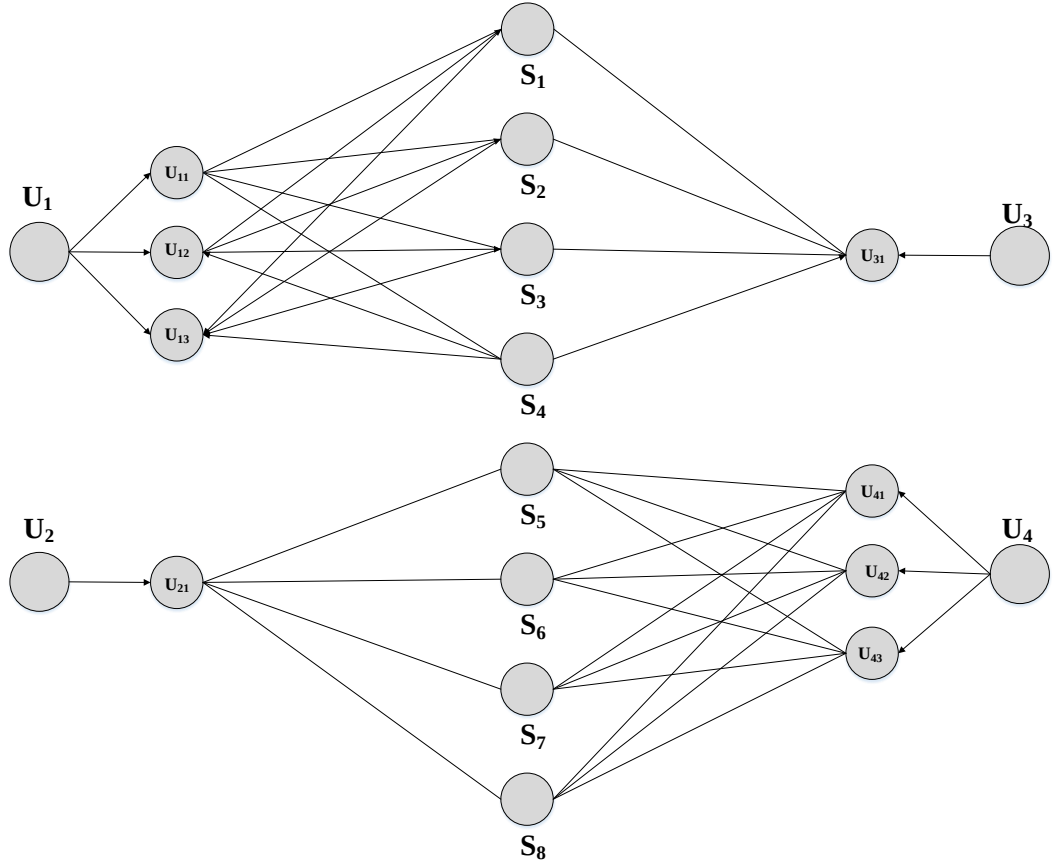
Bu bölümde ağ kodlamalı OFDMA sistemlerde Çoklu- R^2EHK algoritması kullanılarak kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı atamasına yönelik örnek bir senaryo düşünülmektedir. Bu senaryoda $U = \{u_1, \dots, u_M\}$, kullanıcı düğümü kümesini ve $S = \{s_1, \dots, s_N\}$, alt-taşıyıcı düğümü kümesini göstermektedir. Yukarıda belirtildiği gibi buradaki senaryo için $M = 4$, $N = 8$, $L = 2$ parametreleri geçerlidir. Farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması için ise örnek olarak $k = [3 \ 1 \ 1 \ 3]$ durumu ele alınmaktadır. Bu parametrelere sahip örnek bir olası rastgele ikili diyagram $G(V_1 \cup V_2, E)$ Şekil 6.5'te gösterilmektedir. Bu ikili diyagram, Şekil 6.2'de verilen biçimdeki ikili hiperdiyagramın, kullanıcı ile hedef ve kullanıcı ile röle arasındaki kanal parametrelerine bağlı olarak yeniden düzenlenmiş biçimidir.

Buradaki diyagramda, kullanıcı ile hedef veya kullanıcı ile röle arasındaki kanal parametrelerinden en az biri eşik değerin üzerinde ise, Çoklu- R^2EHK algoritmasına uygun olarak kullanıcı ile alt-taşıyıcı arasında tek bir bağlantı yolu çizilmiştir.



Şekil 6.5: Ağ kodlamalı OFDMA sisteminde kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması için örnek bir olası ikili diyagram.

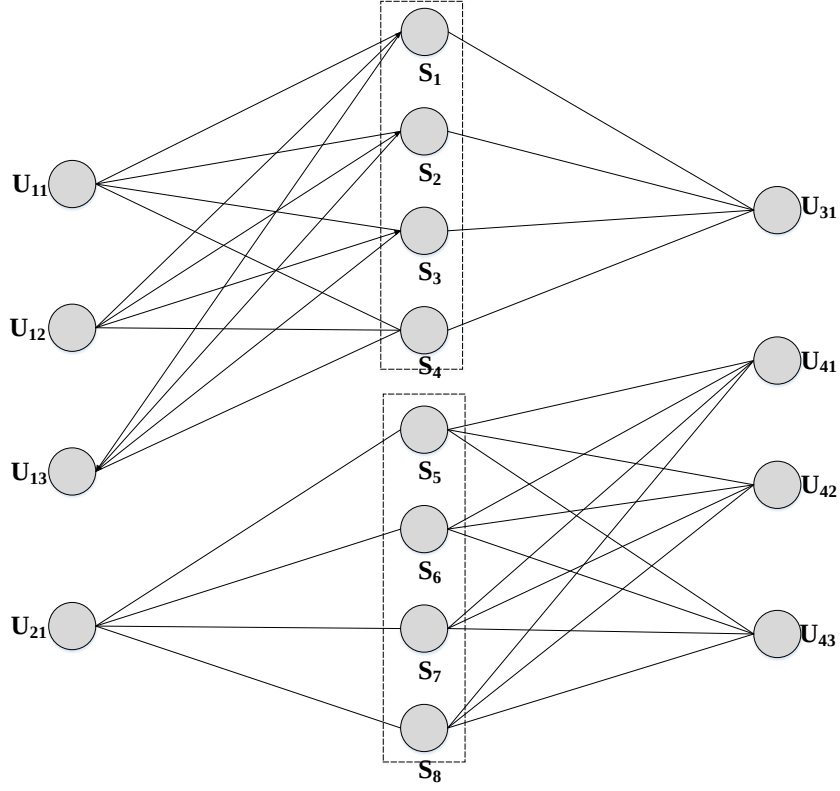
Bu örnekte Çoklu- R^2EHK algoritmasında belirtilen ve kullanıcılar arasında adaleti sağlamak amacıyla döndürme işleminin yapıldığı varsayılmaktadır. Her bir kullanıcı düğümü $k = [3 \ 1 \ 1 \ 3]$ vektöründeki değerlere göre çoğullanmaktadır. Çoğullanmış kullanıcılar ile oluşturulan yeni diyagram Şekil 6.6'da gösterilmektedir. Buna göre, 1. ve 4. kullanıcı üçer adet, 2. ve 3. kullanıcı birer adet düğüme çoğullanmaktadır.



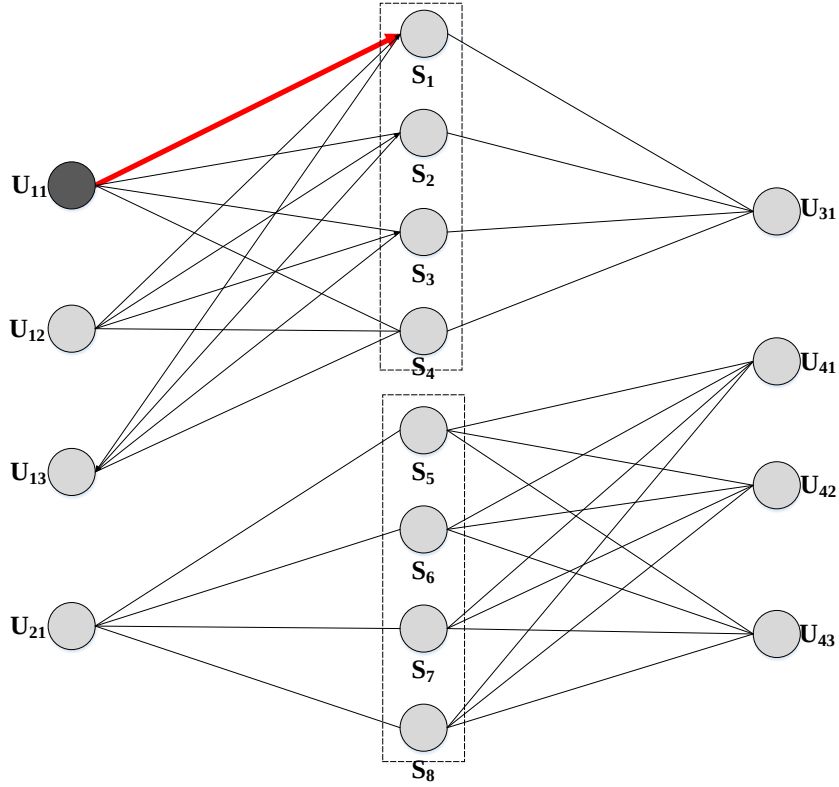
Şekil 6.6: Kullanıcı düğümlerinin çoğullanması.

Şekil 6.7’de, daha önceki örneklerde de yapıldığı gibi, çoğullama işlemi yeni biçimde gösterilmektedir. Yapılan düğüm çoğullaması nedeniyle kullanıcı düğümleri için yeni bir düğüm seti oluşturulmuştur. Düğüm çoğullamasının ardından diyagram üzerinde algoritma uygulanarak maksimum kullanıcı – alt-taşıyıcı eşlemesi bulunmaktadır.

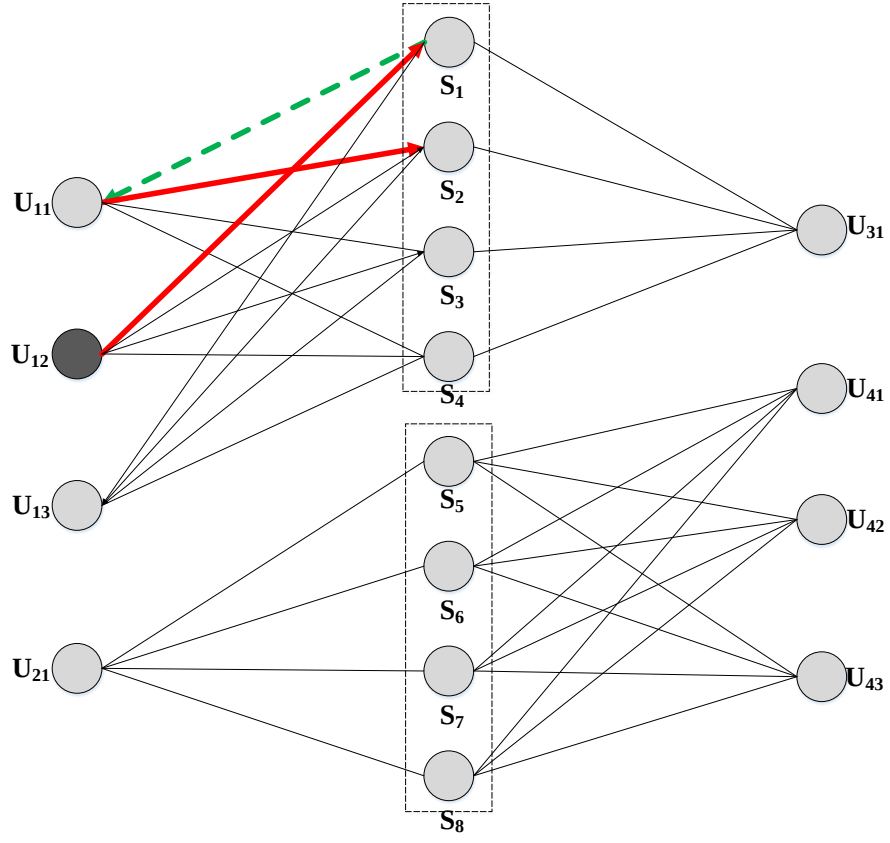
Şekil 6.8’de çoğullanmış olan düğümler ile elde edilen yeni diyagram üzerinden eşleme algoritması ile elde edilen ilk eşleme gösterilmektedir. Şekil 6.8’den Şekil 6.18’e kadar Çoklu- R^2EHK algoritmasının buradaki örnek diyagrama uygulanmış şekli adım adım gösterilmektedir. Koyu renkli düğümler o aşamada hangi kullanıcıdan başlanarak artırımı-yolun bulunduğunu göstermektedir.



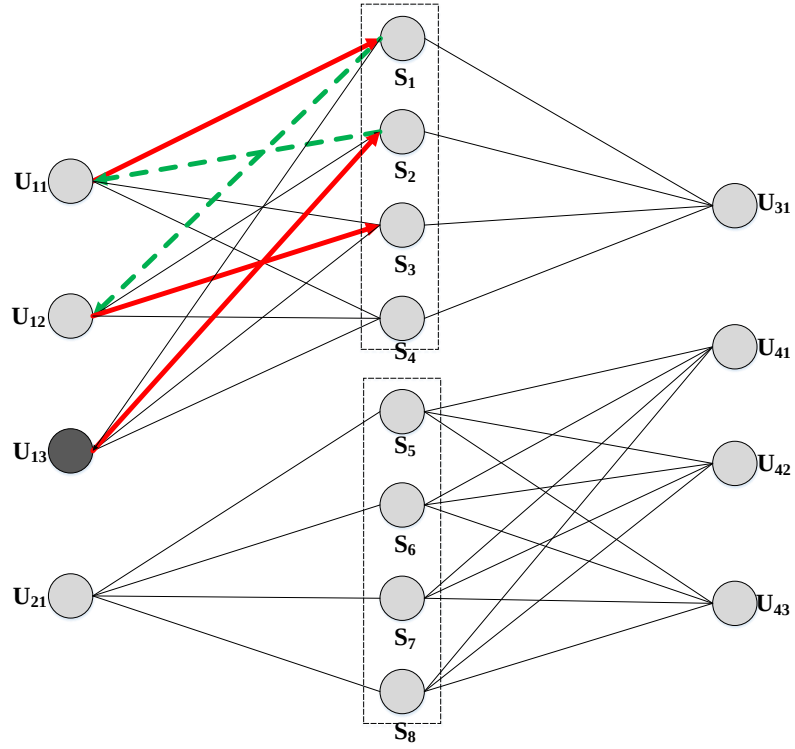
Şekil 6.7: Kullanıcı düğümlerinin çoğullanması sonrası oluşan yeni diyagram.



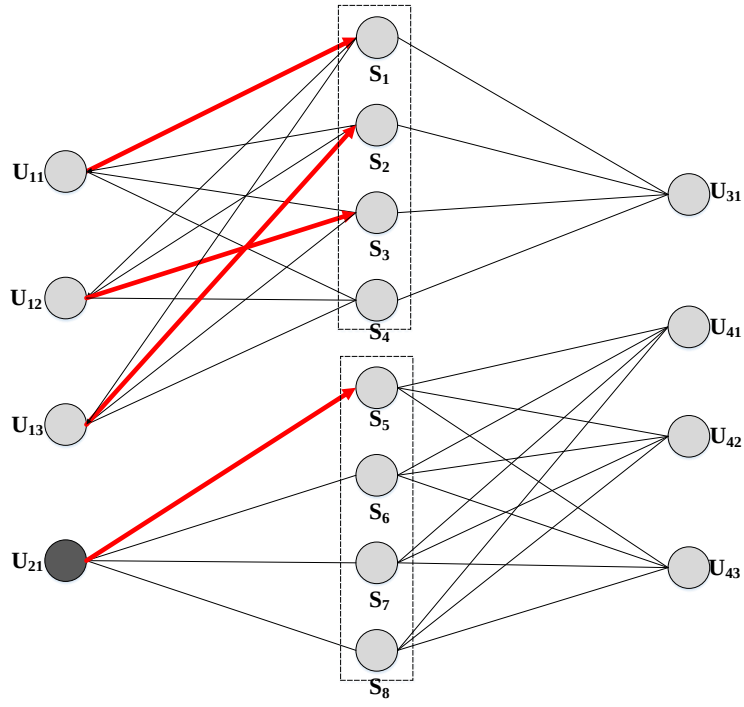
Şekil 6.8: 1. eşleme, $(1 \rightarrow 1)$.



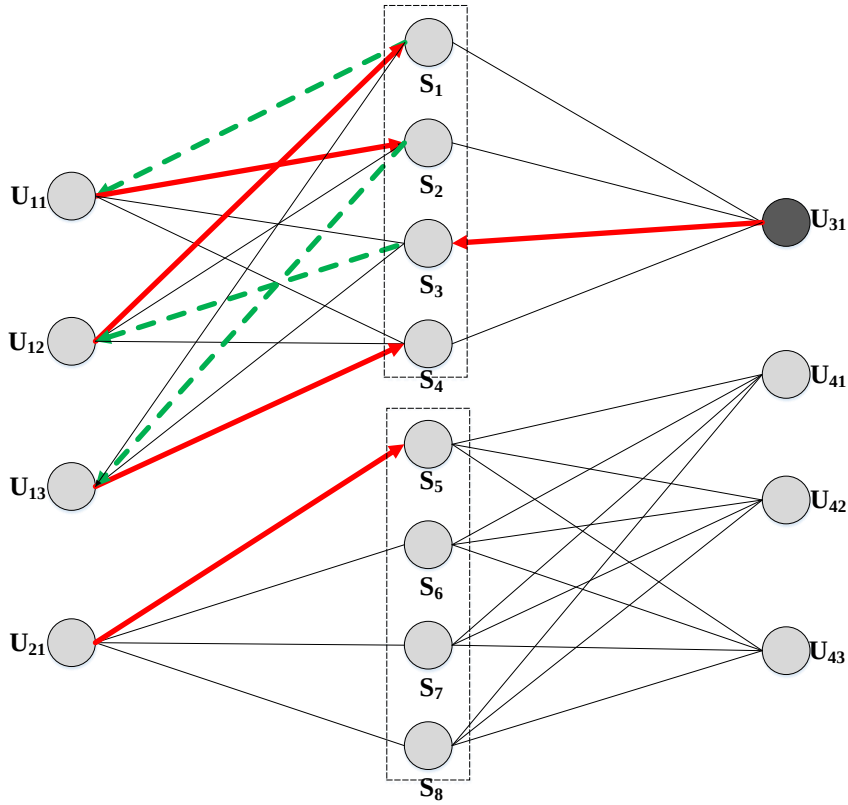
Şekil 6.9: 2. eşleme, $(2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2)$.



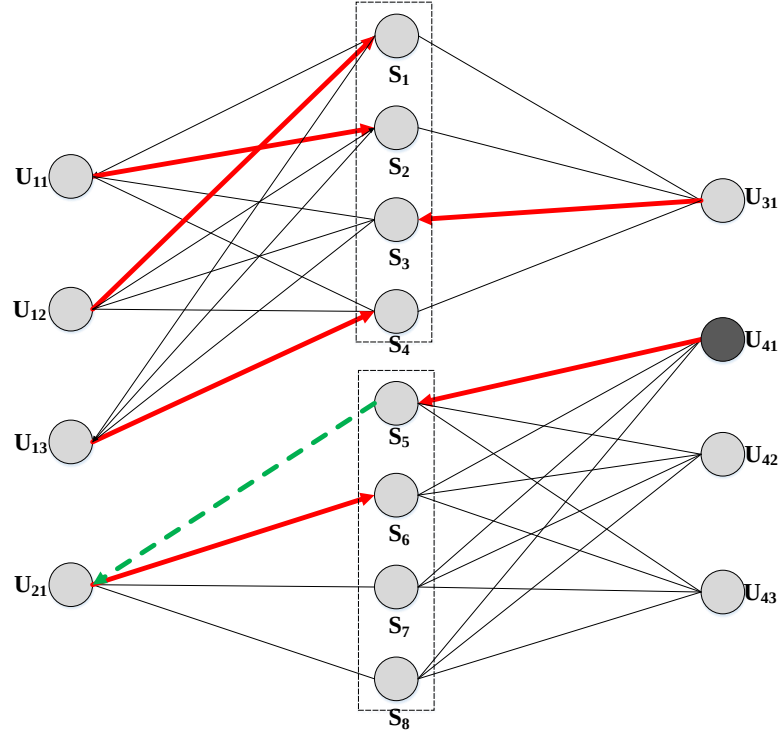
Şekil 6.10: 3. eşleme, $(3 \rightarrow 2) - (1 \rightarrow 1) - (2 \rightarrow 3)$.



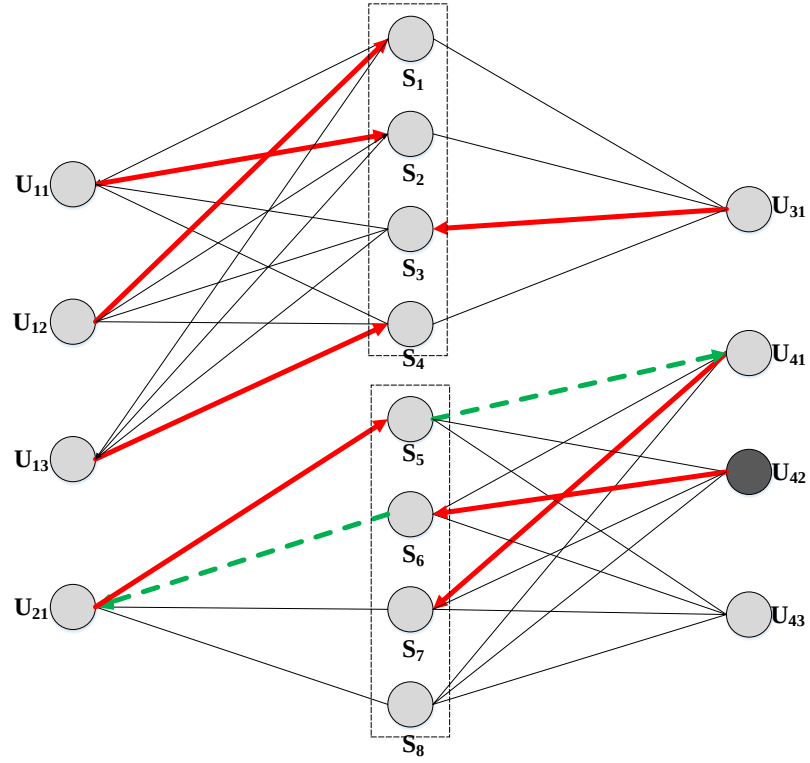
Şekil 6.11: 4. eşleme, $(3 \rightarrow 2) - (1 \rightarrow 1) - (2 \rightarrow 3) - (4 \rightarrow 5)$.



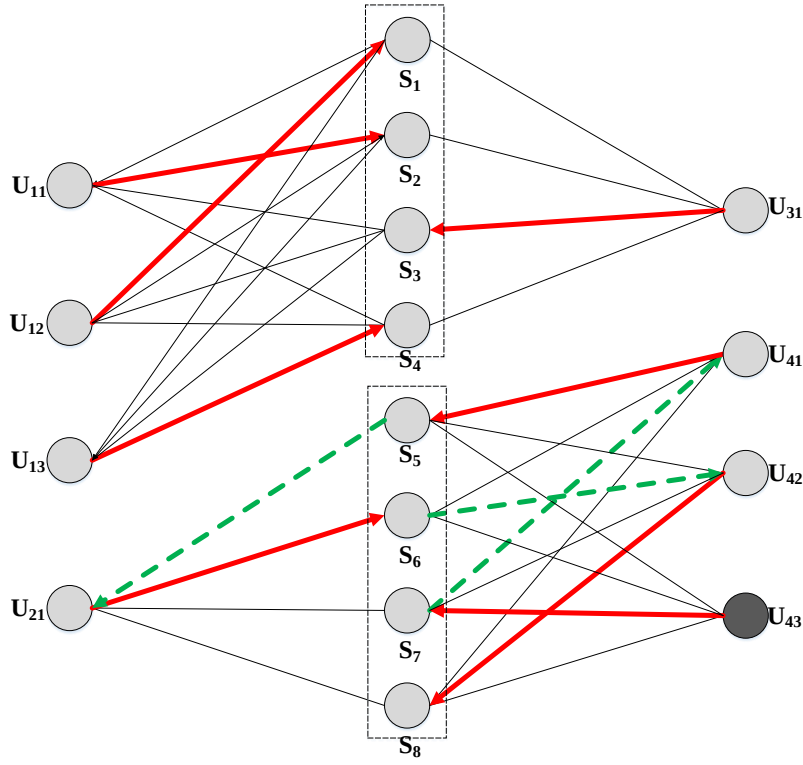
Şekil 6.12: 5. eşleme, $(5 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4) - (4 \rightarrow 5)$.



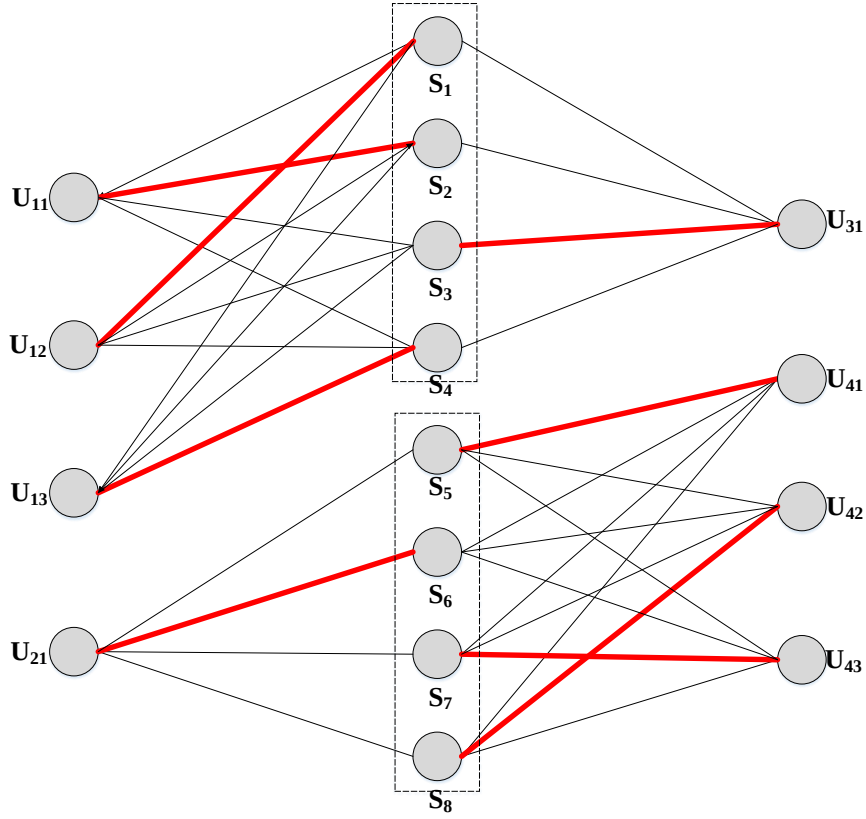
Şekil 6.13: 6. eşleme, $(6 \rightarrow 5) - (4 \rightarrow 6) - (5 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4)$.



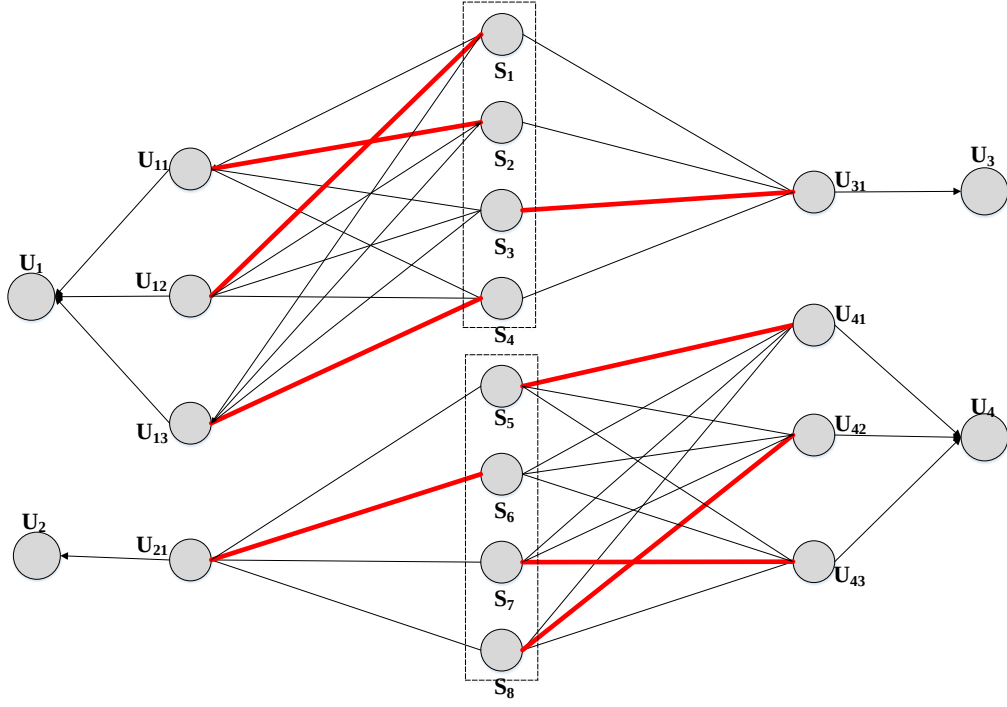
Şekil 6.14: 7. eşleme, $(7 \rightarrow 6) - (4 \rightarrow 5) - (6 \rightarrow 7) - (5 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4)$.



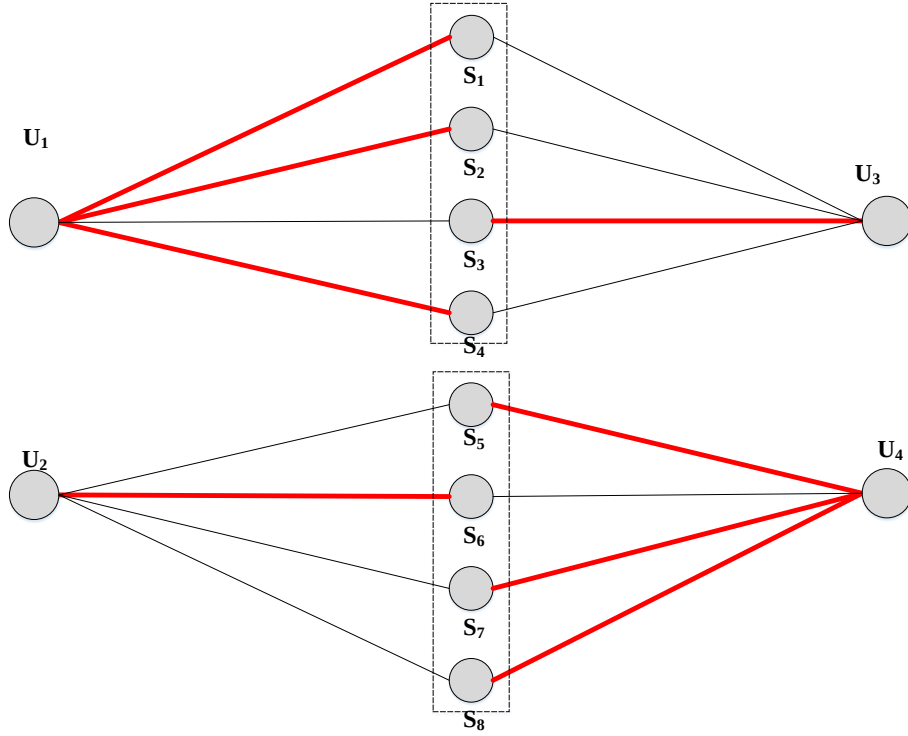
Şekil 6.15: 8. eşleme, $(8 \rightarrow 7) - (6 \rightarrow 5) - (4 \rightarrow 6) - (7 \rightarrow 8) - (5 \rightarrow 3) - (2 \rightarrow 1) - (1 \rightarrow 2) - (3 \rightarrow 4)$.



Şekil 6.16: Çoğullanmış düğümlerin son eşleme durumu.



Şekil 6.17: Çokullanan kullanıcı düğümlerinin eski haline getirilmesi.

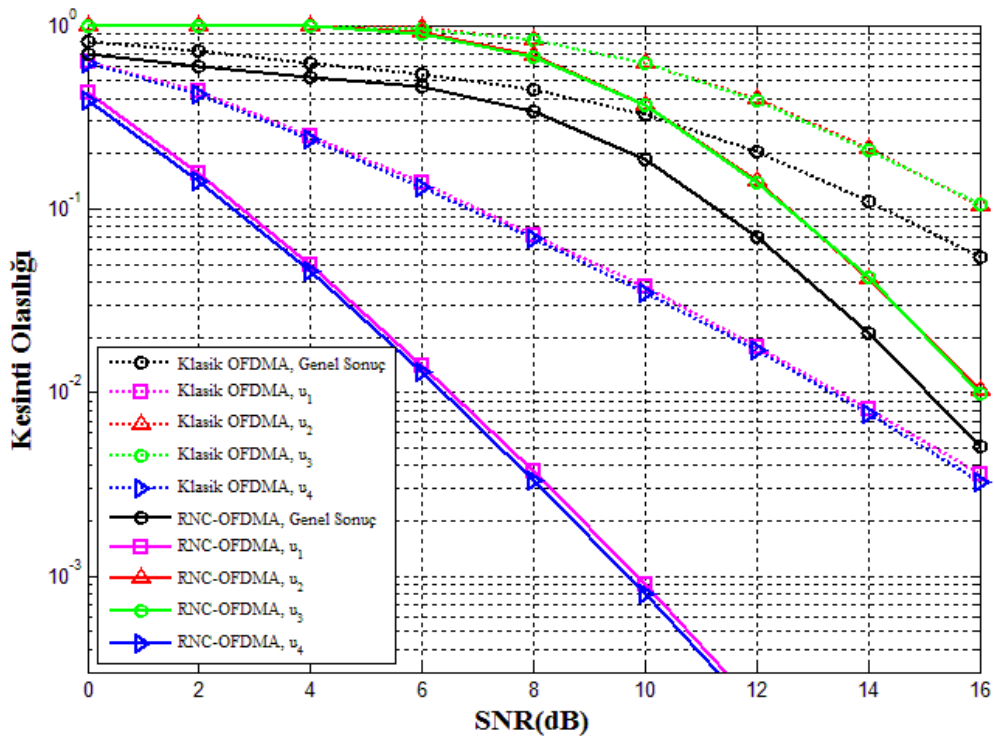


Şekil 6.18: Çoklu- R^2EHK algoritması ile maksimum eşlenmiş ikili diyagram.

Şekil 6.18’da alt-taşıyıcı atama işleminden sonra elde edilen eşlenmiş diyagram gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi $k = [3 \ 1 \ 1 \ 3]$ vektörüne göre 1. ve 4. kullanıcıya üçer adet, 2. ve 3. kullanıcıya ise birer adet alt-taşıyıcı ataması başarılı bir şekilde yapılmaktadır. Hiçbir kullanıcı kesintide kalmamıştır.

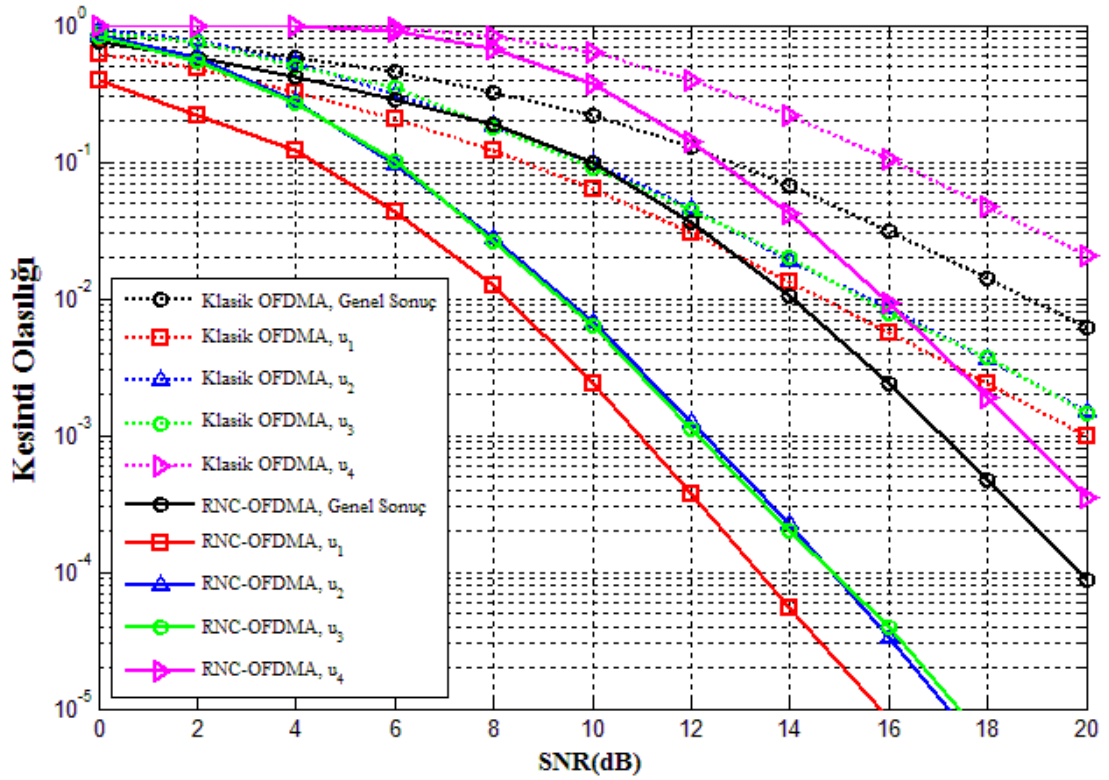
6.5 Ağ kodlamalı OFDMA Sisteminde Kullanıcı Başına Sabit Bandverimliliği Durumunda Rayleigh ve Nakagami-m Sönümlemeli Kanallardaki Benzetim Sonuçları

Bu bölümde elde edilen sonuçlar için bandverimliliği $R = 1$ bit/sn/Hz olarak kabul edilmektedir. Şekil 6.19’da, Rayleigh sönümlemeli kanallarda $M = 4$, $N = 8$ için klasik ve ağ kodlamalı OFDMA sisteminde kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılması ile ilgili kullanıcı başına ve ortalama kesinti olasılığı sonuçları gösterilmektedir. Burada da, ortalama kesinti olasılığı, kullanıcı kesinti olasılıklarından (5.5)’teki ifade ile hesaplanmaktadır. Kesikli çizgiler ile gösterilen eğriler, klasik OFDMA sistemine ait kesinti olasılık eğrilerini göstermektedir.



Şekil 6.19: $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 1 \ 1 \ 3]$ durumunda klasik OFDMA ile RNC-OFDMA sistemlerinin Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına ve ortalama kesinti olasılıklarının karşılaştırması.

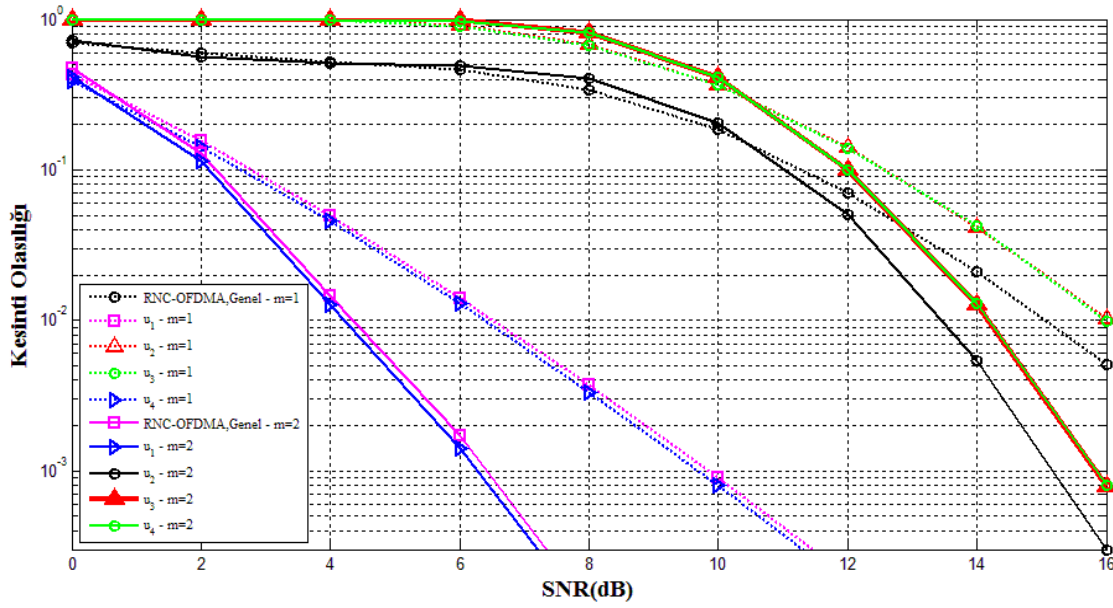
Buradaki parametrelere göre elde edilen bu sonuçta, klasik OFDMA sistemi için çeşitleme derecesi 2 iken tek röleli rastgele ağ kodlamalı OFDMA sistemde çeşitleme derecesi 4'tür. Ağ kodlamalı OFDMA sisteminin performansına bakıldığında, çeşitleme derecesi röle kullanımından dolayı iki katına çıkarken aynı zamanda kesinti olasılığının büyük ölçüde azaldığı görülmektedir. Şekil 6.20'de ise, Şekil 6.19'daki sonuçtan farklı olarak $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ durumu için klasik OFDMA ve ağ kodlamalı OFDMA sistemlerindeki kullanıcı başına kesinti olasılığı karşılaştırması yapılmıştır.



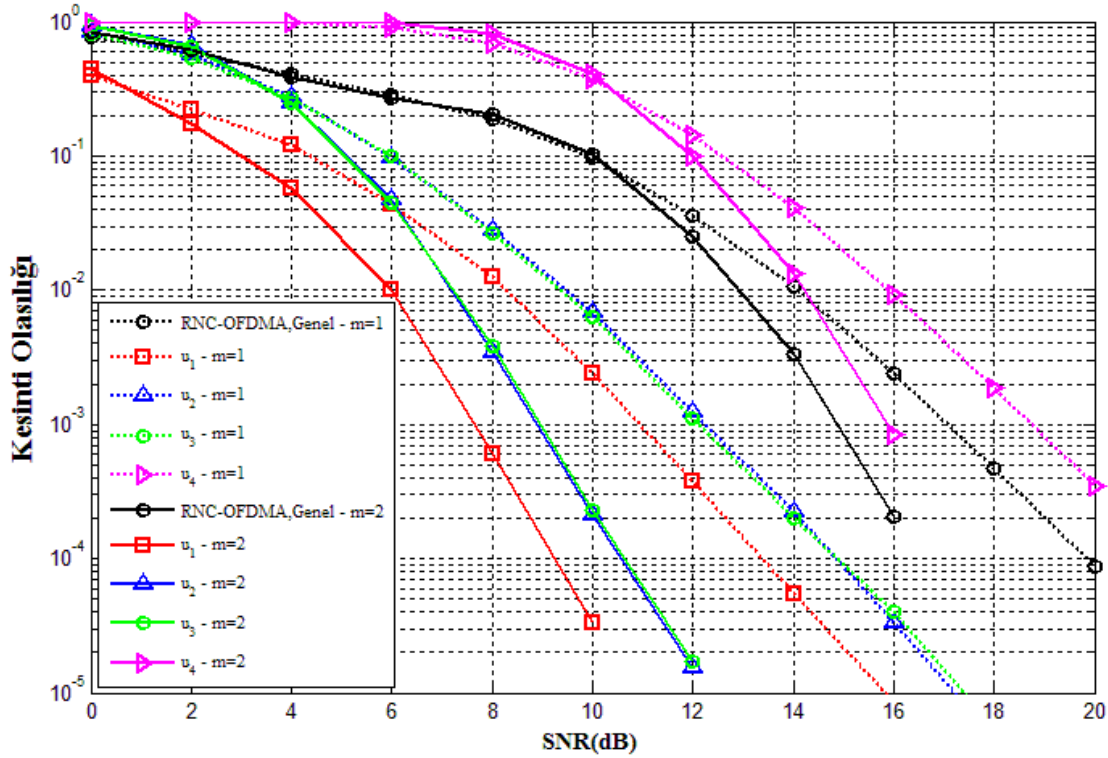
Şekil 6.20: $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ durumunda klasik OFDMA ile RNC-OFDMA sistemlerinin Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına ve ortalama kesinti olasılıklarının karşılaştırması.

Şekil 6.20'de de klasik OFDMA sistemine ait eğrilere göre çeşitleme derecesi 2 iken, ağ kodlamalı OFDMA sisteminde çeşitleme derecesi 4'tür ve kesinti olasılığı da klasik OFDMA sistemine göre oldukça düşüktür. Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'deki sonuçlarda en az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcıların performanslarının kötü olduğu görülmektedir. Klasik OFDMA sonuçlarında olduğu gibi burada da genel performansı belirlemede baskın olan en az sayıda alt-taşıyıcı atanmış olan kullanıcılardır. Sırasıyla, Şekil 6.21'de $k = [3 \ 1 \ 1 \ 3]$ durumu için, Şekil 6.22'de $k =$

[3 2 2 1] durumu için ağ kodlamalı OFDMA sistemlerinin Rayleigh ve Nakagami-m sönümlemeli kanallarda elde edilen sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6.21: $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 1 \ 1 \ 3]$ durumunda RNC-OFDMA sisteminin Rayleigh ve Nakagami-m kanaldaki kesinti olasılıkları karşılaştırması.



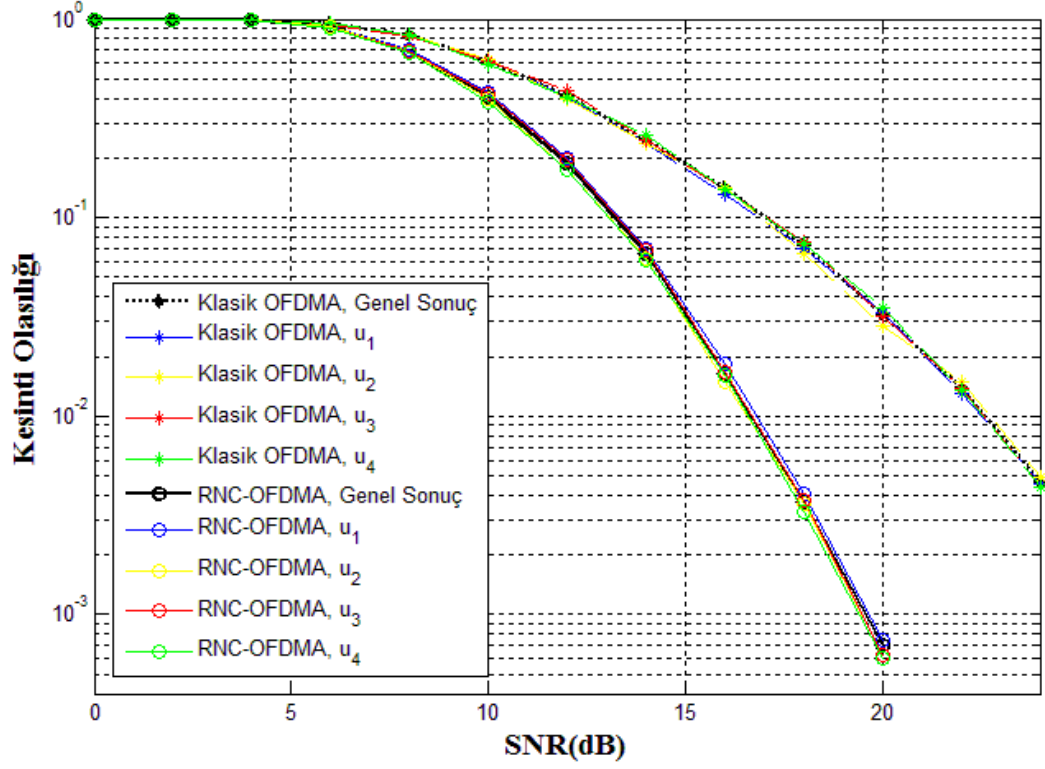
Şekil 6.22: $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ durumunda RNC-OFDMA sisteminin Rayleigh ve Nakagami-m kanaldaki kesinti olasılıkları karşılaştırması.

Nakagami-m kanalındaki çeşitleme derecesi, $m = 2$ iken Rayleigh kanal durumuna göre 2 kat fazla olmaktadır; yani yukarıdaki sonuçlarda Rayleigh için çeşitleme derecesi 4 iken, Nakagami parametresi $m = 2$ olduğunda çeşitleme derecesinin beklenildiği gibi yüksek SNR değerlerine doğru 8'e yaklaştığı görülmektedir. Böylece, Nakagami-m kanalındaki kesinti olasılıkları da oldukça düşmekte ve performans artmaktadır.

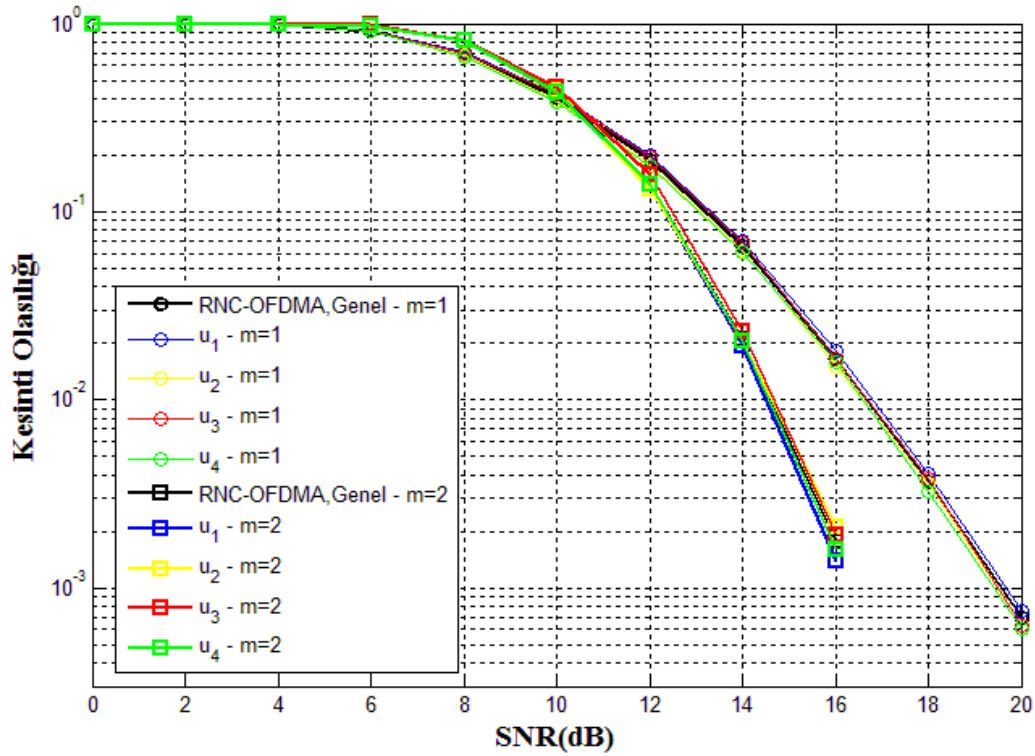
6.6 Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemde Kullanıcı Başına Değişen Bandverimliliği Durumunda Rayleigh ve Nakagami-m Sönümlemeli Kanallardaki Benzetim Sonuçları

Kullanıcı başına değişen bandverimliliği ile ilgili ele alınan ilk senaryoda kullanıcılara vaad edilen bandverimliliği, atama yapılacak olan alt-taşıyıcı sayısı ile doğru orantılı olarak seçilmiştir. Bu senaryo için örnek bir sonuç Şekil 6.23'te gösterilmektedir. Burada $M = 4$, $N = 8$, $L = 2$, $k = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ ve $R = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ durumları için Rayleigh sönümlemeli kanalda klasik OFDMA ve ağ kodlamalı OFDMA sistemlerinin kesinti olasılığı sonuçları elde edilmiştir ve karşılaştırılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi tüm kullanıcıların kesinti olasılıkları birbirine eşittir. Klasik OFDMA sistemlerinde olduğu gibi her kullanıcıya vaad edilen bandverimliliği o kullanıcıya atanan alt-taşıyıcı sayısı ile doğru orantılıdır. Kullanıcılara, alt-taşıyıcı ihtiyacı kadar bandgenişliği ayrılması durumunda beklenildiği gibi her kullanıcının kesinti olasılığı aynı çıkmaktadır. Klasik OFDMA sistemine göre, ağ kodlamalı OFDMA sistemde kullanıcıların kesinti olasılıkları röle kullanımından dolayı daha düşük olmaktadır ve çeşitleme derecesi iki katına çıkmakta; yani yukarıdaki parametreler için 4 olmaktadır.

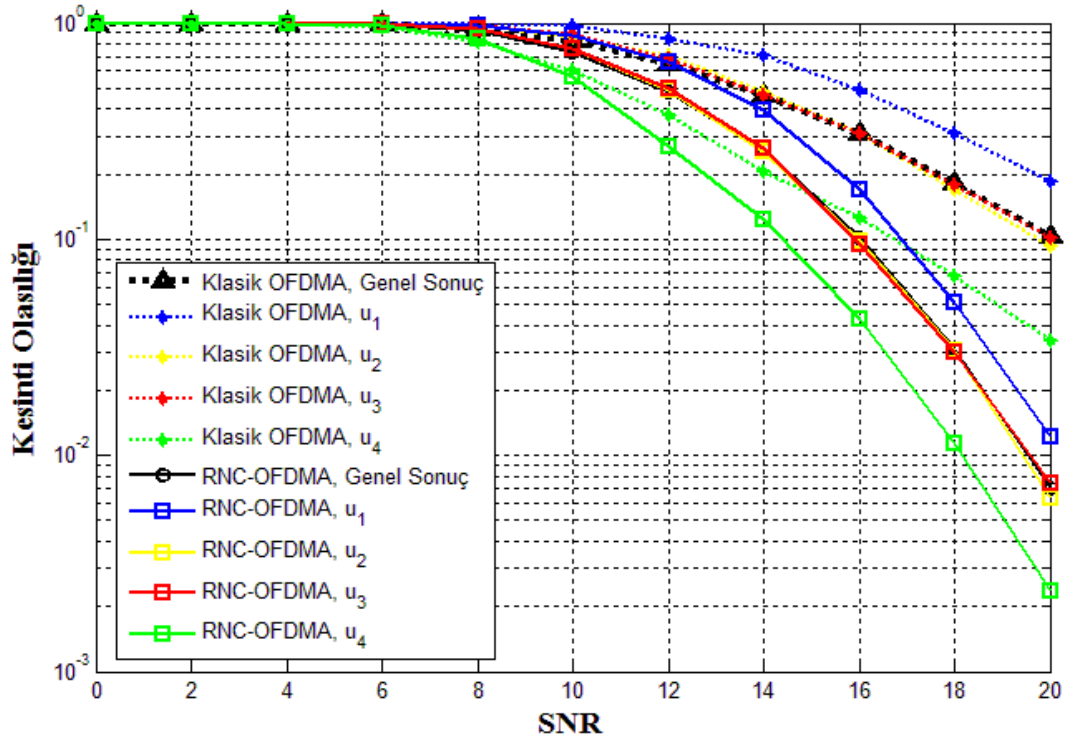
Şekil 6.24'te, $k = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ ve $R = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ durumlarında ağ kodlamalı OFDMA sistemi için Nakagami-m kanallardaki kullanıcı başına kesinti olasılığı sonuçları elde edilmiştir. Nakagami-m kanaldaki sonuçlardan da görülebileceği gibi kullanıcılara vaad edilen bandgenişliği, atanan alt-taşıyıcı sayıları ile orantılı olduğundan yine tüm kullanıcılar aynı kesinti olasılığına sahip olmaktadır.



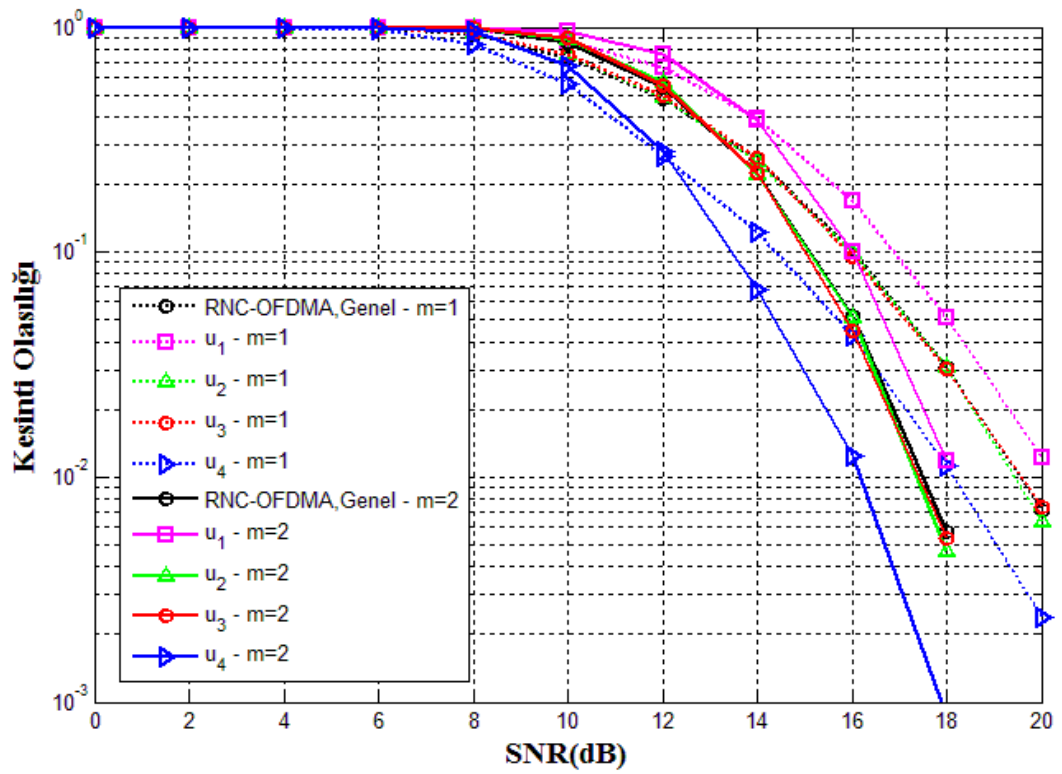
Şekil 6.23: $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ ve $R = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ durumunda klasik OFDMA ve RNC-OFDMA için Rayleigh kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılıkları.



Şekil 6.24: $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ ve $R = [3 \ 1 \ 3 \ 1]$ durumunda RNC-OFDMA için Rayleigh ve Nakagami-m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılıkları.



Şekil 6.25: $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ ve $R = [3.8 \ 2.4 \ 2.4 \ 1.1]$ ve durumunda kullanıcı başına kesinti olasılıkları karşılaştırması.



Şekil 6.26: $M = 4$ ve $N = 8$ ve $L = 2$ için $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ ve $R = [3.8 \ 2.4 \ 2.4 \ 1.1]$ durumunda Rayleigh ve Nakagami-m kanaldaki kullanıcı başına kesinti olasılıkları.

Şekil 6.24'teki sonuçlara göre, Nakagami-m kanalındaki performans beklenildiği gibi daha iyi olmaktadır. Şekil 6.25'te, $M = 4$, $N = 8$, $L = 2$ için $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ ve $R = [3.8 \ 2.4 \ 2.4 \ 1.1]$ durumları için klasik ve ağ kodlamalı OFDMA kanalları için kullanıcı başına kesinti olasılıkları karşılaştırılmaktadır. Nakagami-m sönümlemeli kanalda çeşitleme derecesi $m = 2$ iken, Rayleigh kanala göre iki katına çıkmaktadır. Şekil 6.26'da, $M = 4$, $N = 8$, $L = 2$, $k = [3 \ 2 \ 2 \ 1]$ ve $R = [3.8 \ 2.4 \ 2.4 \ 1.1]$ durumları için ağ kodlamalı OFDMA sisteminde, Rayleigh ve Nakagami-m sönümlemeli kanallardaki kesinti olasılığı sonuçları elde edilmiştir. Burada da klasik OFDMA sistemlerinde olduğu gibi daha fazla alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcılara iletim kanalı başına daha yüksek iletim oranı sağlandığı varsayılmıştır. Daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcıların iletim kanalında sağlamaları gereken iletim oranı, daha fazla sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcılara göre daha az olmaktadır. Bu nedenle daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcıların performansları böyle bir senaryo için daha iyi olmaktadır. Nakagami-m kanaldaki performans ise beklenildiği gibi Rayleigh sönümlemeli kanaldaki performanstan daha iyidir. Nakagami-m kanaldaki çeşitleme derecesi de Rayleigh kanaldaki çeşitleme derecesine göre artmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, yeni nesil haberleşme sistemlerinde, özellikle RNC'li sistemlerde OFDMA tekniği kullanılması durumunda kullanıcılara en uygun şekilde alt-taşıyıcı ataması yapılması problemi ele alınmıştır. Çalışmanın başında, diyagram kuramından ve eşleme yöntemlerinden bahsedilmiştir. Diyagram kuramı kapsamında, alt-taşıyıcı ataması için ikili diyagramlar kullanılmıştır. İkili diyagramlarda maksimum eşlemenin yapılmasını sağlayan artırılmış yol ve değişimli yol kavramları açıklanmış olup bu kavramların uygulanma mantığı anlatılmıştır. İkili diyagramlardaki eşleme, ayrıca görsel olarak da şekiller ile detaylı olarak anlatılmıştır. Çalışmanın devamında, ele alınan OFDMA sistemi için kanal modelinden bahsedilmiştir. Kanal modelinde, her kullanıcı için frekans seçici yavaş sönmülemeli kanallar dikkate alınmıştır. İlk olarak, uyumluluk bandgenişliği sayısının toplam alt-taşıyıcı sayısına eşit olduğu durum ele alınmıştır. Bu durumda her alt-taşıyıcı aynı zamanda bir uyumluluk bandgenişliğini temsil etmektedir. Her bir kullanıcı ve alt-taşıyıcılar arasındaki kanallar birbirinden bağımsız ve farklıdır. OFDMA sistemlerinde her kullanıcı için en büyük çeşitleme kazancı bağımsız alt-taşıyıcıların sayısına eşittir. Buradaki kanal modeli için alt-taşıyıcı atama yöntemi olarak *RVRHK* algoritması kullanılmıştır. *RVRHK* algoritması ile maksimum eşleme sağlanırken kullanıcılar arasında adalet de sağlanmaktadır. Kullanıcılar arasında döndürme işlemi yapılarak her bir kullanıcıya eşit oranda kesintide olmayan bir alt-taşıyıcı atama önceliği verilmektedir. Benzetim sonuçlarına bakıldığında, eğer uyumluluk bandgenişliği sayısı sistemdeki birbirinden bağımsız alt-taşıyıcıların toplam sayısına eşit ise sistemin çeşitleme derecesi sistemdeki alt-taşıyıcı sayısına eşit olmaktadır. Burada, alt-taşıyıcı sayısı kadar farklı kanal bulunmaktadır. Bu farklı kanal sayısı da sistemin çeşitleme derecesini vermektedir.

RVRHK algoritması her bir kullanıcıya bir adet alt-taşıyıcı atamayı sağlayan bir algoritmadır. *RVRHK* algoritması genel olarak alt-taşıyıcı sayısının kullanıcı sayısının iki katından az olduğu durumlar için kullanılmaktadır. Alt-taşıyıcı sayısı

kullanıcı sayısının iki katı veya iki katından büyük olduğu durumlarda *RVRHK* algoritması kullanıcılara maksimum sayıda alt-taşıyıcı ataması yapmakta yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, *RVRHK* algoritmasının daha geliştirilmiş hali olan ve daha genel sonuçlar elde etmeyi sağlayan *R²EHK* algoritması kullanıcılara birden fazla alt-taşıyıcı atama imkanı sunan bir algoritma olarak karşımıza çıkmaktadır. *H*-eşleme yaklaşımı sayesinde sadece alt-taşıyıcı ataması yapılarak en uygun çeşitleme-çoğullama ödünleşimi sağlanmaktadır. *R²EHK* algoritmasının uygulandığı kanal modelinde, belirli bir alt-taşıyıcı grubu, bir uyumluluk bandgenişliğini oluşturmaktadır. Bu durumda, aynı uyumluluk bandgenişliği içerisinde bulunan alt-taşıyıcılar birbiriyle ilişkili olmaktadır; yani bu durumda her bir kullanıcı ve alt-taşıyıcılar arasındaki kanallar aynı kabul edilmektedir. Sistemin çeşitleme derecesi doğrudan sistemdeki uyumluluk bandgenişliği sayısına eşit olmaktadır. Benzetim sonuçları elde edilirken ilk olarak Rayleigh kanal modeline göre sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, literatürde ilk kez olarak Nakagami-*m* sönümlemeli kanallar için bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Nakagami-*m* kanal modeli için bulunan sonuçlardan çeşitleme derecesinin, Rayleigh kanal modeli için bulunan sonuçlardaki çeşitleme derecesinin *m* katı olduğu görülmüştür. Böylece, *m* parametresinin artmasıyla elde edilen kesinti olasılığı da oldukça azalmaktadır. Bu da Nakagami-*m* sönümlemeli kanallarda sistemin performansının oldukça iyi olduğunu göstermektedir.

Literatürdeki çalışmalarda, kullanıcılara maksimum eşleme yapılarak sabit sayıda alt-taşıyıcı atanması üzerine ve de kullanıcılara sabit bandverimliliği vaad edilmesi durumundaki sonuçlar bulunmaktadır. Bu tezde, yeni nesil haberleşme sistemleri için daha uygun ve daha gerçekçi bir yaklaşım olarak kullanıcıların ihtiyaç duydukları kriterleri karşılamak amacıyla her kullanıcının ihtiyacına yönelik, farklı bandverimliliği durumlarında farklı sayılarda alt-taşıyıcı ataması yapmak öngörülmüştür. Kullanıcılar arasındaki atama önceliğini değiştirmeden, kullanıcı başına ihtiyaca göre farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması yapmak için yeni bir yöntem, Çoklu-*R²EHK* algoritması önerilmiştir. Bu yöntem için farklı sayıda alt-taşıyıcı ataması, “kullanıcı başına sabit bandverimliliği” ve “kullanıcı başına değişen bandverimliliği” olarak iki ayrı başlık altında incelenmiştir.

Kullanıcı başına karşılanması gereken sabit bandverimliliği durumunda, atama yapılacak alt-taşıyıcı sayısına göre her kullanıcının için karşılanması gereken iletim oranı farklı olmaktadır. Daha fazla sayıda alt-taşıyıcı atanacak olan bir kullanıcının sağlaması gereken iletim oranı, alt-taşıyıcılar ile bağlı olduğu her kanal için daha az olmaktadır. Böylece daha fazla alt-taşıyıcı atanmış olan bir kullanıcı diğerlerine göre daha az kesintide kalmış olmaktadır; yani sistem bir kullanıcıya daha çok sayıda alt-taşıyıcı atamasını daha kolay bir şekilde yapabilmektedir. Kullanıcılara, sabit sayıda alt-taşıyıcı atanması durumunda, her kullanıcının kesinti olasılığı aynı olurken burada kullanıcıların ihtiyaçlarından dolayı karşılamaları gereken iletim oranları da değiştiğinden kesinti olasılıkları da farklılık göstermektedir. Kullanıcılara sabit sayıda alt-taşıyıcı atanması durumundaki genel performansa göre, kullanıcılara farklı sayıda alt-taşıyıcı atanması durumundaki genel performans daha kötü olmaktadır. Bu da beklenen bir sonuçtur. Çünkü, buradaki öncelikli amaç kullanıcıların iletim hızı ihtiyaçlarını karşılamaktır. Dolayısıyla, bu ihtiyaçları karşılamak için performanstan ödün verilmektedir. Buradaki önemli bir sonuç da, en az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılmış olan kullanıcının, sistemin kesinti olasılığının belirlenmesinde baskın olmasıdır. En az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcı diğer kullanıcılara göre daha kötü bir performans gösterdiğinden genel performansı da kötüleştirmektedir.

Kullanıcı başına değişen bandverimliliği durumunda ise yukarıda anlatılan sonuçlar geçerli olmamaktadır. Bu durumda, daha çok sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılacak olan bir kullanıcının, diğer kullanıcılara göre çok daha fazla bandverimliliğini karşılaması gerektiği öngörülmektedir. Bu nedenle, daha çok sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılacak olan bir kullanıcı, daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılacak olan bir kullanıcıya göre daha yüksek oranda bir iletim oranı sağlamalıdır. Bu durumda, bu kullanıcı için kesinti olasılığı, daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması yapılan kullanıcıdan daha fazla olmaktadır. Başka bir deyişle, sistemde kullanıcılara daha az sayıda alt-taşıyıcı ataması daha kolay bir şekilde yapılabilir. Ayrıca bu durum ile ilgili önemli bir sonuç da, her kullanıcı için karşılanması gereken iletim oranı, atanacak olan alt-taşıyıcı sayısı ile orantılı olarak belirlenirse, tüm kullanıcıların aynı kesinti olasılığına sahip olmaktadır. Bir OFDMA sistemindeki kullanıcılara farklı sayılarda alt-taşıyıcı ataması ile ilgili sonuçlar Rayleigh ve Nakagami-m sönümlmeli kanallar için elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Klasik OFDMA sistemi için yapılan bu analizler, ağ kodlamalı OFDMA sistemlerine genelleştirilmiştir. Özellikle, kullanıcı başına sabit ve değişen bandverimliliği durumlarında farklı sayılarda alt-taşıyıcı ataması yapmak ağ kodlamalı OFDMA sistemleri için büyük avantaj sağlamaktadır. Çünkü bu sistemlerde iletim hızını ve bandverimliliğini artırmak, sınırlı frekans bandı nedeniyle zorlaşmaktadır. Ağ kodlamalı sistemlerde diğer önemli bir sorun ise kullanıcılara en uygun şekilde kaynak ataması yapmaktır. Ağ kodlamalı OFDMA sistemleri, hücresel yapıya göre daha homojen bir yapıya sahip olabileceği için frekans bandının çok daha verimli kullanılması gerekmektedir. Bu tezde klasik OFDMA sistemleri için önerilmiş olan Çoklu- R^2EHK algoritması, ağ kodlamalı OFDMA sistemleri için de kullanılabilmektedir. Ağ kodlamalı OFDMA sistemlerinde, röle kullanımından dolayı alt-taşıyıcıları kullanıcılara bağlayan birden çok yol olabilmektedir. Bu nedenle, ağ kodlamalı OFDMA sistemlerini diyagramlar ile temsil etmek amacıyla bir ikili hiperdiyagram modeli önerilmektedir. İkili hiperdiyagram modeli ile ağ kodlamalı OFDMA sistemlerinde kullanıcı ve alt-taşıyıcı ilişkisi net bir şekilde gösterilebilmekte ve hiperdiyagramlar kullanılarak kullanıcılara alt-taşıyıcı ataması yapılabilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, ağ kodlamalı OFDMA sistemlerde, önerilen algoritmalar ile alt-taşıyıcı ataması yapıldığında klasik OFDMA sistemine göre tek röle olması durumunda iki kat daha fazla çeşitleme derecesi elde edilebilmektedir. Böylece, kesinti olasılığı da büyük oranda düşmektedir ve daha iyi performanslar elde edilmektedir. Klasik OFDMA sistemlerinde olduğu gibi, ağ kodlamalı OFDMA sistemleri için de alt-taşıyıcı ataması yapılırken kullanıcılar arasındaki adalet korunmaktadır.

Bu tez kapsamında, elde edilmiş olan yeni sonuçlar ile gelecek nesil telsiz haberleşme sistemlerinde kullanılması olası bir takım yeni alt-taşıyıcı atama teknikleri için bir altyapı oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar kullanılarak mevcut çalışmalar daha da geliştirilebilir olup yeni çalışmalara kapı açması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. Yeung** (2000). Network information flow, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216.
- [2] **L. Cimini** (1985). Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 33, no. 7, pp. 665–675.
- [3] **B. Bai, W. Chen, Z. Cao, K.B. Letaief** (2008). Achieving high frequency diversity with subcarrier allocation in OFDMA systems," *Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM*, vol., no., pp.1,5, 30.
- [4] **B. Bai, W. Chen, Z. Cao, K. B. Letaief** (2009). Optimal diversity-multiplexing tradeoff in OFDMA systems, *ICC IEEE International Conf. on* , vol, no., pp. 1,5.
- [5] **B. Bai, W. Chen, Z. Cao, K. B. Letaief** (2010). Max-matching diversity in OFDMA systems, *IEEE Trans. Commun.*, vol.58, no.4, pp.1161,1171.
- [6] **B. Bai, W. Chen, K. B. Letaief, Z. Cao** (2011). Diversity-multiplexing tradeoff in OFDMA systems: an H-matching approach, *IEEE Trans. Commun.*, vol.10, no.11, pp.3675,3687.
- [7] **S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard, and J. Crowcroft** (2008). XORs in the air: practical wireless network coding, *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 16, no. 3, pp. 497–510.
- [8] **H. Xu, B. Li** (2009). XOR-assisted cooperative diversity in OFDMA wireless networks: optimization framework and approximation algorithms, *IEEE INFOCOM*, pp. 2141-2149.
- [9] **M. S. Kaiser, A. Iqbal, S. Baseer, F. Ali, K. M. Ahmed** (2010). Performance analysis of network coded bidirectional relaying in OFDM networks, *Electrical and Computer Engineering (ICECE), 2010 International Conference on*, pp. 62-65.
- [10] **Z. Xinyu and L. Baochun.** (2011). Network-coidng-aware dynamic subcarrier assignment in OFDMA-based wireless networks, *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 60, no.9, pp. 4609-4619.
- [11] **Z. Dan., N. Mandayan** (2011). Resource allocation for multicast in an OFDMA network with random network coding, *IEEE INFOCOM*, vol. , no., pp. 391-395.
- [12] **C. Wei. and S. Yu** (2010). Random Network Coding for Unicast in Wireless Cellular Network. *Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 6th International Conference on*, vol., no., pp. 1,4.

- [13] **K. B. Letaief and Y. J. A. Zhang** (2006). Dynamic multiuser resource allocation and adaptation for wireless systems, *IEEE Wireless Commun. Mag.*, vol. 13, no. 4, pp. 38-47.
- [14] **R. Wonjong and J. M. Cioffi** (2000). Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel, in *IEEE Proc. Veh. Technol. Conf.*, vol. 2, no., pp. 1085,1089.
- [15] **Y. Li and G. Stuber** (2005), Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications. Springer-Verlag.
- [16] **D. Tse, P. Viswanath, and L. Zheng** (2004). Diversity-multiplexing tradeoff in multiple-access channels, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 9, pp.1859–1874.
- [17] **H. Jianwei, V. G. Subramanian, R. Agrawal, and R. A. Berry** (2006). Downlink scheduling and resource allocation for OFDM systems. In *IEEE Proc. Conf. Inf. Science Syst.* pp. 1272-1279.
- [18] **B. Bollobás** (2001). Random Graphs, 2nd edition. Cambridge University Press.
- [19] **H. W. Kuhn** (1955). The Hungarian method for the assignment problem, Naval Research Logistics Quarterly, Kuhn's original publication. pp. 83–97.
- [20] **J. E. Hopcroft and R. M. Karp** (1973). An $n^{5/2}$ algorithm for maximum matchings in bipartite graphs, *SIAM J. Comp.*, vol. 2, no. 4, pp. 225–231.
- [21] **E.A Dinic.** (1970). Algorithm for solution of a problem of maximum flow in a network with power estimation. *Soviet Math. Doklady* pp. 1277–1280.
- [22] **J. Edmonds, R. M. Karp** (1972). Theoretical improvements in algorithmic efficiency for network flow problems. *Journal of the ACM* (Association for Computing Machinery) 19 pp. 248–264.
- [23] **R. Diestel** (2005). Graph Theory, 3rd edition. Springer-Verlag.
- [24] **Hakan T. ve Wang Z.** (2011). Wireless network code design and performance analysis using diversity-multiplexing tradeoff, *IEEE Trans. Commun.* vol. 59, no. 2, pp. 488-496.
- [25] **C. Berge.** (1957), Two theorems in graph theory, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 43 pp. 842–844.
- [26] **M. Karpinski and W. Rytter** (1998). Fast Parallel Algorithms for Graph Matching Problems. Oxford University Press.
- [27] **C. Wong, R. Cheng, K. B. Letaief, and R. Murch** (1999). Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* vol. 17, no. 10, pp. 1747–1758.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Buğra ENGİN

Doğum Yeri ve Tarihi: 04.10.1988 / Balıkesir

E-Posta: bugraeng@gmail.com

Lisans: 2011, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik Haberleşme Mühendisliği

Mesleki Deneyim:

- ACTS İletişim ve Teknoloji Hiz. A.Ş. – Network Uzmanı (07.2014 - ...)
- BEOX LLC – Teknik Destek Mühendisi (05.2013 - 06.2014)
- LCC Telekomünikasyon – Test Mühendisi (04.2012 - 11.2012)

Yayın Listesi:

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

- Buğra Engin., İbrahim Altunbaş., Semiha Tedik., Güneş Karabulut Kurt., OFDMA Sistemlerde Rastgele İkili Diyagramlar ile Farklı Sayıda Alt-taşıyıcı Atama, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU) 2015, değerlendirilmek üzere gönderilmiştir.
- Semiha Tedik Başaran, Güneş Karabulut Kurt, Buğra Engin., İbrahim Altunbaş., OFDMA Sistemleri için Birleşik Güç ve Alt-taşıyıcı Atama Tekniği, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU) 2015, değerlendirilmek üzere gönderilmiştir.