İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA ÜST SEZGİSELLER İLE KANAL ATAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emrullah GAZİOĞLU

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilgisayar Mühendisliği Programı

MAYIS - 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA ÜST SEZGİSELLER İLE KANAL ATAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emrullah GAZİOĞLU
(504101543)

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilgisayar Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. A. Şima ETANER UYAR

MAYIS - 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504101543 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Emrullah GAZİOĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA ÜST SEZGİSELLER İLE KANAL ATAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ"** başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. A. Şima ETANER UYAR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Ayşegül GENÇATA YAYIMLI** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Yrd. Doç. Dr. Fatma CORUT ERGİN Marmara Üniversitesi	.....
		.....

Teslim Tarihi : **5 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **29 Mayıs 2015**

Aileme ve arkadaşlarıma,

ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanması sürecinde yardımlarını esirgemeyen çok değerli arkadaşlarım Bilge Süheyla AKKOCA'ya, Hakan GÜNDÜZ'e, Cumali TÜRKMENOĞLU'na ve değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Berk CANBERK ve Doç. Dr. A. Şima ETANER UYAR'a teşekkür ederim.

Mayıs - 2015

Emrullah GAZİOĞLU
(Araştırma Görevlisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Taslağı 2
2. BİLİŞSEL RADYOLAR **3**
2.1 Motivasyon 3
2.2 Bilişsel Radyo Ağları 4
2.3 Bilişsel Radyolarda Bilişsel Döngü 5
2.4 Geleneksel Kablosuz Ağlarda Kanal Ataması 6
2.5 Bilişsel Radyo Ağlarında Kanal Atama Algoritması 7
2.6 Çözüm Yöntemleri 7
3. PROBLEMİN TANIMI **9**
3.1 Literatür Taraması 9
3.2 Kanal Atama Problemi 10
4. DOĞA ESİNLİ SEZGİSELLER **13**
4.1 Karınca Kolonisi Optimizasyonu 14
4.2 Adaptif İteratif Yapıcı Arama 15
5. ÜST SEZGİSELLER **17**
5.1 Üst Sezgisellerin Sınıflandırılması 18
5.2 Seçim üst sezgiselleri 19
5.2.1 Yapıcı sezgisellere dayalı yaklaşımlar 19
5.2.2 Bozucu sezgisellere dayalı yaklaşımlar 19
5.2.3 Sezgisel seçimi ve kabul etme stratejileri 20
5.3 Doğa Esinli Sezgisellerin Üst Sezgisel Olarak Kullanılması 21
6. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMİ **23**
6.1 Yöntemin Bileşenleri 23
6.1.1 Çözüm adayı 23
6.1.2 Atama tablosu 24
6.1.3 İkincil kullanıcı özellikleri 24
6.1.4 Başarım fonksiyonu 24
6.1.5 Düşük seviyeli sezgiseller 25

6.2 Önerilen Algoritma 26
7. TESTLER VE DEĞERLENDİRME 29
7.1 Test Ortamının Oluşturulması 29
7.2 Başarım Hesaplaması 30
7.3 Test Sonuçları ve Tartışma 30
7.3.1 Lamda değerinin etkisi 31
7.3.2 Toplam İK sayısının etkisi 32
7.3.3 Toplam kanal sayısının etkisi 33
7.4 Genel Değerlendirme 33
8. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMA 35
KAYNAKLAR 37
EKLER 41
EK A.1 43
ÖZGEÇMİŞ 55

KISALTMALAR

BR	:	Bilişsel Radyo
Bİ	:	Baz İstasyonu
BRA	:	Bilişsel Radyo Ağı
BK	:	Birincil Kullanıcı
İK	:	İkincil Kullanıcı
MBRA	:	Merkezi Bilişsel Radyo Ağı
SGO	:	Sinyal-Gürültü Oranı
DP	:	Doğrusal Programlama
DOP	:	Doğrusal Olmayan Programlama
İDP	:	İkili Doğrusal Programlama
KTDP	:	Karışık Tamsayı Doğrusal Programlama
ÜS	:	Üst Sezgisel
DSS	:	Düşük Seviyeli Sezgisel
KAP	:	Kanal Atama Problemi
BG	:	Bant Genişliği
DES	:	Doğa Esinli Sezgiseller
KKO	:	Karınca Kolonisi Optimizasyonu
PSO	:	Parçacık Sürü Optimizasyonu
AİYA	:	Adaptif İteratif Yapıcı Arama
YA	:	Yerel Arama
KABO	:	Kanal Ataması Başarım Oranı
KDO	:	Kanal Doluluk Oranı
KS	:	Kanal Sayısı
PS	:	Paket Sayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1: Sezgisel seçimi ve kabul kriterleri stratejileri 20

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Spektrum boşluğu 3
Şekil 2.2 : Merkezi bilişsel radyo ağı..... 4
Şekil 2.3 : Bilişsel radyolarda bilişsel döngü..... 5
Şekil 3.1 : BK ve İK için zaman-BG ataması 10
Şekil 3.2 : Örnek spektrum kullanım oranları..... 11
Şekil 5.1 : Üst sezgisel yapısı. 17
Şekil 5.2 : Üst sezgisellerin sınıflandırılması..... 19
Şekil 6.1 : Örnek çözüm adayı..... 23
Şekil 6.2 : Örnek atama tablosu 24
Şekil 7.1 : Farklı λ değerleri için KDO sonuçları. ($KS = 60$ ve $\dot{I}K = 300$) 31
Şekil 7.2 : Farklı $\dot{I}K$ değerleri için KDO sonuçları. ($\lambda = 5$ ve $KS = 60$)..... 32
Şekil 7.3 : Farklı kanal sayıları için KDO sonuçları. ($\lambda = 5$ ve $\dot{I}K = 300$)..... 33
Şekil A.1 : Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 1$ ve $PS = 10$).... 44
Şekil A.2 : Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 1$ ve $PS = 20$).... 46
Şekil A.3 : Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 5$ ve $PS = 10$).... 48
Şekil A.4 : Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 5$ ve $PS = 20$).... 50
Şekil A.5 : Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 10$ ve $PS = 10$).. 52
Şekil A.6 : Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 10$ ve $PS = 20$).. 54

BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA
ÜST SEZGİSELLER İLE
KANAL ATAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ

ÖZET

Yazılım Tanımlı Radyolar'ın (Software Defined Radio) son versiyonu olan Bilişsel Radyolar (Cognitive Radio) alanında yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Bilişsel Radyolar, çevrelerinde olan bitenden haberdar olmaları için tasarlanmış yazılımlardır. Böylece, çevresinden geri bildirim alarak öğrenme yapar ve topladığı verileri kullanarak çevreye uyum göstermeye çalışır. Bilişsel radyoların en büyük avantajı, lisanslı olmamasına rağmen lisanslı sistemlerde çalışabilmesidir.

Kablosuz iletişimdeki hızlı büyüme sonucunda hem lisanslı hem de lisanssız frekans spektrumundaki talep giderek artmaktadır. Son yapılan çalışmaların sonuçlarına göre, sabit spektrum atama politikası, spektrum kullanımının çok zayıf kalmasına sebep olmaktadır. Bu sorunu çözmek için Bilişsel Radyo teknolojisi, "Beyaz Boşluk" ya da "Spektrum Boşluğu" da denilen, işgal edilmemiş spektrum bantlarının kesikli periyotlarına erişimi sağlayabilmek adına iyi sonuçlar vermeye başlamıştır.

Bilişsel radyo ağlarının en önemli gerekliliği spektrum boşluklarını algılamaktır. Bilişsel radyoların önemli bir özelliği ise başka kullanıcıları rahatsız etmeden kullanılmayan spektrumları algılayıp, paylaşmaktır. Spektrumun hangi aralıklarının uygun olduğunu belirler ve lisanslı kullanıcılar spektrumu kullandığı sırada bunu tespit ederler. Spektrum algılama, bilişsel radyonun spektrum boşluklarını tespit etmesine olanak sağlar.

Merkezi işbirlikli algılamada, Baz İstasyonu adı verilen bir yapı işbirlikli algılamanın üç adımlı sürecini kontrol eder. İlk olarak baz istasyonu bir frekans bandı ya da kanalı seçer ve tüm Bilişsel Radyolara yerel algılama yapmaları talimatını verir. İkinci olarak, tüm Bilişsel Radyolar topladıkları bilgileri kontrol kanalı üzerinden baz istasyonuna rapor ederler. Üçüncü ve son olarak da, birleştirme merkezi, bu verileri kullanarak birincil kullanıcının varlığı hakkında karar verir ve verdiği bu kararı tekrardan Bilişsel Radyolara geri dağıtır.

Bilişsel Radyo Ağları terminolojisinde, Birincil Kullanıcı, bir spektruma atanmış olan lisanslı kullanıcı anlamına gelirken, İkincil Kullanıcı ise spektruma erişebilmesi için izni olmayan lisanssız kullanıcı anlamına gelmektedir. Bu sebepten dolayı, ikincil kullanıcılar bilişsel radyo teknolojisi kullanarak, spektrum birincil kullanıcılar tarafından kullanılmadığı sırada hatta erişim sağlarlar.

Bir bilişsel radyo ağı temel olarak birincil ağlar ve ikincil ağlardan oluşur. Normalde, birincil ağlar, ikincil kullanıcılar ile spektrum paylaşımı yapmazlar. Hatta, böyle bir özellikleri de yoktur. Diğer taraftan, ikincil ağların, kanalları ikincil kullanıcılara atamalarını sağlayan bir baz istasyonu vardır. Literatürde bir çok bilişsel radyo ağı çeşidi vardır. Bu çalışmada, Merkezi bilişsel radyo ağları üzerinde durulmuştur.

Kanal Atama Problemi, bilişsel radyo ağlarında çakışmaları önlemek için kullanılan temel bir tekniktir. kanal atamanın amacı kanal kullanım oranını maksimize etmek

için kanalların ikincil kullanıcılara da atanmasıdır. kanal atamada, kanal kullanım oranı, ikincil kullanıcılara ait veri ile birincil kullanıcılara ait veri aynı anda iletime geçirilerek artırılabilir.

Doğa Esinli Sezgiseller, gerçek doğadaki bazı olaylar ve onların işleyişinden esinlenilmiş mekanizmalardır. Doğa esinli sezgisellerin son yıllarda popülerleşmesinin sebebi olarak bir çok optimizasyon probleminin oldukça karmaşık olmasıdır.

Karınca kolonisi optimizasyonu, en çok kullanılan sürü zekası tekniklerinden biridir ve gerçek karıncaların davranışlarından esinlenilmiştir. Karınca kolonisi optimizasyonu yönlendirme problemleri, atama problemleri, zamanlama ve sıralama problemleri ve altküme problemleri gibi bir çok katışımsal optimizasyon problemlerine oldukça başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

Adaptif İteratif Yapıcı Arama, karınca kolonisi optimizasyonunun tek karınca ile uygulanmış farklı bir formudur. Karınca kolonisi optimizasyonunda olduğu gibi Adaptif İteratif Yapıcı Aramada da karınca bir çözüm adayı oluşturur ve sonraki iterasyon için feromon tablosunu günceller. Bu çalışmamızda, AİYA'yı bir ÜS mekanizması olarak kullandık.

Üst sezgiseller, düşük seviyeli sezgisellerin arama uzayında çalışan metotlardır. Dinamik ortam problemlerini çözmek için şimdiye kadar bir çok yöntem denenmiş ve belli sonuçlar alınmıştır. Ancak, bu yöntemlerin de bazen ortamın durumuna göre birbirlerinden daha iyi oldukları anlar görülmüştür. İşte bu noktada, üst sezgiseller, yani "sezgisel seçen sezgisel" teknikler devreye girer.

Bu tezde, kanal atama problemini çözmek için adaptif iteratif yapıcı arama algoritmasını kullanan bir üst sezgisel tasarladık. söz konusu tasarım altı farklı düşük seviyeli sezgisel içermektedir.

Yaptığımız çalışmayı test etmek için 72 farklı test örneği oluşturduk ve her birini ayrı ayrı hem önerdiğimiz algoritma ile hem de her bir düşük seviyeli sezgisel ile ayrı ayrı çözdük. Aldığımız sonuçlara baktığımızda, üst sezgisellerin, bilişsel radyolarda kanal ataması problemi için oldukça başarılı olduğunu gözlemledik.

SOLVING CHANNEL ASSIGNMENT PROBLEM WITH HYPER-HEURISTICS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

SUMMARY

Wireless networks communicate with each other using radio spectrum bands which are assigned to license owners. Traditionally, there is a fixed spectrum assignment policy issued by the governments or the communication companies. Because of the fixed spectrum assignment policy, a large portion of the spectrum stays unused. To utilize these unused spectrum portions, the idea of Cognitive Radio was proposed by J.Mitola. The aim of Cognitive Radio is maximizing spectrum utilization in an intelligent way. By doing that, Cognitive Radio enables the unlicensed users to also access the spectrum. However, this process should be done in such a way that when an unlicensed user attempts to use a spectrum, it should not interfere with the licensed users.

In Cognitive Radio Networks terminology, *a primary user* is a licensed user which has been assigned a spectrum, while *a secondary user* is an unlicensed user which does not have a license to access a spectrum. For this reason, Secondary users use the cognitive radio technology to access the spectrum when the spectrum is not occupied by the primary user. This unoccupied spectrum portion is represented by *a spectrum hole* or *white space*.

In Cognitive Radio Networks, primary users are known as the owners of a spectrum. They can use the spectrum whenever they want. On the other hand, secondary users can use the spectrum if and only if the spectrum is not currently occupied by the primary user. However, recently, a new data transmission protocol, which allows a primary user and a secondary user to work cooperatively, was proposed. In this method, a primary user releases a portion of the bandwidth to the secondary user to transmit its own data in exchange for making the secondary user to also relay the primary user's data.

Channel Assignment is a fundamental technique to control interference in the cognitive radio networks. The aim of channel assignment is to assign channels to secondary users in order to maximize channel utilization. In channel assignment, the percentage of channel utilization can be increased by transmitting secondary user's data and primary user's data simultaneously.

In this study, we use hyper-heuristics to solve the channel assignment problem. In literature, channel assignment algorithms try to optimize various objectives such as utilization optimization, interference minimization, network overhead minimization, throughput maximization, etc. Our objective is to maximize channel utilization. Hyper-heuristics are methods that work on the search space of low level heuristics rather than on the search space of solution candidates. Single point based search heuristics or population based meta-heuristics can serve as hyper-heuristics. In this study we use a single point based search heuristic, namely *Adaptive Iterated Construction Search*.

Hyper-heuristics are defined as heuristics that select heuristics. A more recent definition of Hyper-heuristics is as: "A hyper-heuristic is an automated methodology for selecting or generating heuristics to solve hard computational search problems". Hyper-heuristics work on a search space of low-level heuristics as opposed to working on the search space of solutions. There are two types of Hyper-heuristics, i.e. *Selection Hyper-heuristics* and *Generation Hyper-heuristics*. Selection Hyper-heuristics choose from existing heuristics defined for a problem, while generation Hyper-heuristics generate new heuristics for a given problem by using components of existing heuristics. In this study we work with selection Hyper-heuristics, so for the rest of the paper we will use Hyper-heuristics to denote selection Hyper-heuristics.

Single point based search approaches as well as population based meta-heuristics, such as ant colony optimization algorithms, can be used as Hyper-heuristics. In this study we use a single point based search approach, namely *Adaptive Iterated Construction Search*. Adaptive Iterated Construction Search can be considered as being a simple Ant Colony Optimization algorithm which works using a single ant.

In our channel assignment problem model, both primary users and secondary users can transmit their data simultaneously on the same channel. In this study, we assume an underlying network architecture. More specifically, a secondary user can utilize the vacant channel as long as it does not disturb the primary user.

To solve the channel assignment problem, we use a Hyper-heuristic approach based on Adaptive Iterated Construction Search. Given a traffic matrix, i.e. the primary users' spectrum usage information for each channel and for each time slot, the Hyper-heuristic aims to assign a channel to the secondary users for each time slot. To accomplish this, first, the Hyper-heuristic constructs a solution candidate which includes a set of low-level heuristics. Then, each low-level heuristic in the solution candidate is invoked in the order given by the solution candidate, to assign a channel to a secondary user. Next, the fitness value of the resulting assignments is calculated.

In this study, we proposed a solution approach to the channel assignment problem in cognitive radio networks which uses the Adaptive Iterated Construction Search algorithm as a Hyper-heuristic to select the secondary users at each step of the channel assignment.

To test the proposed approach we generated several test instances based on four parameters as follows: (i) *Traffic matrix*: We generated the traffic matrix using the Poisson distribution to determine the arrival times of the packets. (ii) *Packet counts*: We used two different packet counts in the experiments. (iii) *Number of secondary users*: Four different settings were used for this parameter. (iv) *Number of channels*: Three different settings were used while generating the test instances.

By using the above parameters we created 72 different test instances.

We evaluate the approaches tested in this study based on two criteria: (i) *Channel Assignment Success Rate* shows the success rate of an approach. It is calculated as the percentage of feasible assignments to the total number of channels. (ii) *Channel Utilization Rate* shows the utilization rate of the channels at time t, weighted by the *Channel Assignment Success Rate*.

To show the effectiveness of the Hyper-heuristic approach which uses six low-level heuristics, each of the 72 test instances was solved with the proposed Hyper-heuristic

(Adaptive Iterated Construction Search) as well as each low-level heuristic separately. Since Adaptive Iterated Construction Search is a stochastic algorithm, we ran the Adaptive Iterated Construction Search algorithm 20 times independently for each test instance. For this reason, in our result plots, we show the average value of 20 runs for Adaptive Iterated Construction Search. The results are shown as *Weighted Channel Utilization Rates over Time*.

The results show that among the low-level heuristics, *Max. Degree* and *Max. Priority* low-level heuristics are the best performers with regard to *channel utilization rate* in all cases. Similarly, *Min. Request* is the best performer among all low-level heuristics with regard to *channel assignment success rate*. However, the channel utilization rate for this low-level heuristic is very low. The reason for this behavior is that this low-level heuristic chooses the secondary users in the increasing order of their requests. It is easier to find a channel assignment for smaller requests, therefore the channel assignment success rate of this low-level heuristic is high. However, since it assigns channels to those secondary users with lower requests first, the channel assignment rates of the assigned channels do not increase much after the assignments. *Min. Degree*, *Max. Request* and *Random* are the worst performing low-level heuristics. In the results given in the thesis, Adaptive Iterated Construction Search is either the best performer or it has a performance of similar quality to the well performing low-level heuristics.

1. GİRİŞ

Kablosuz cihazlar, birbirleri ile iletişim kurmak için lisans sahiplerine atanmış olan radyo spektrum bandlarını kullanırlar. Normalde, devletler ya da iletişim şirketleri tarafından uygulanan sabit bir spektrum atama politikası vardır [1]. Ancak bu politika yüzünden büyük bir kısım spektrum kullanılmadan kalmaktadır. Bu kullanılmayan spektrum kısımlarını kullanılır hale getirmek için Joseph Mitola tarafından Bilişsel Radyo (Cognitive Radio) (BR) fikri önerildi [2, 3].

İlk kez 1999 yılında Joseph Mitola tarafından ortaya atılan Bilişsel Radyo (Cognitive Radio) ifadesiyle, git gide sayıları azalan spektrum bantları sorununa çözüm bulunmaya çalışılmıştır. Bilişsel Radyo teknolojisinin amacı, hali hazırda atanmış olan spektrum bantlarına dinamik olarak erişmektir. IEEE 1900.1 çalışma grubu tarafından yapılan Bilişsel Radyo tanımı şu şekildedir: "Bulunduğu ortamı algılayabilen ve algılama sonuçlarına göre otomatik olarak çıkarım yapabilen radyo sistemleridir. Bu sistemler, bilgi tanımlaması, otomatik çıkarım ve makine öğrenme mekanizmalarını kullanarak iletişimi sağlarlar. Ayrıca dinamik ve otomatik olarak operasyon ortamına bağlı olarak çalışma parametrelerini değiştirebilirler".

Yazılım Tanımlı Radyolar'ın (Software Defined Radio) son versiyonu olan Bilişsel Radyolar (Cognitive Radio) alanında yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Bilişsel Radyolar, çevrelerinde olan bitenden haberdar olmaları için tasarlanmış yazılımlardır. Böylece, çevresinden geri bildirim alarak öğrenme yapar ve topladığı verileri kullanarak çevreye uyum göstermeye çalışır. Bilişsel radyoların en büyük avantajı, lisanslı olmamasına rağmen lisanslı sistemlerde çalışabilmesidir.

Bilişsel Radyo teknolojisinin amacı spektrum kullanım oranını akıllı bir şekilde maksimize etmektir. Böylece, lisanssız kullanıcıların da spektruma erişmesinin önü açılmış olur. Ancak, bu işlem yapıldığında lisanssız kullanıcıların, lisanslı kullanıcılar ile çakışmasının önüne geçilmesi de gerekmektedir. Lisanssız kullanıcıların spektruma erişmesi için öncelikle lisanslı kullanıcının hattı kullanım bilgisine ihtiyacı vardır. Bu bilgi, lisanslı kullanıcının hattı hangi aralıklarla kullandığı ve hattın ne kadarını

kullandığı (Bant Genişliği) ile alakalıdır. Bir kez bu bilgiler elde edildikten sonra, bir baz istasyonuna (Bİ) gönderilir. Bİ, kendisine bir çok lisanssız kullanıcıdan gelen bilgileri veri birleştirme yöntemleri ile birleştirir ve çıkan sonuçlara göre lisanssız kullanıcıların spektrumu kullanması için kanal atamaları yapar.

BR Ağları (BRA) (Cognitive Radio Networks) terminolojisinde, Birincil Kullanıcı (Primary User) (BK), bir spektruma atanmış olan lisanslı kullanıcı anlamına gelirken, İkincil Kullanıcı (Secondary User) (İK) ise spektruma erişebilmesi için izni olmayan lisanssız kullanıcı anlamına gelmektedir. Bu sebepten dolayı, İK'lar BR teknolojisi kullanarak, spektrum BK tarafından kullanılmadığı sırada hatta erişim sağlarlar.

1.1 Tezin Taslağı

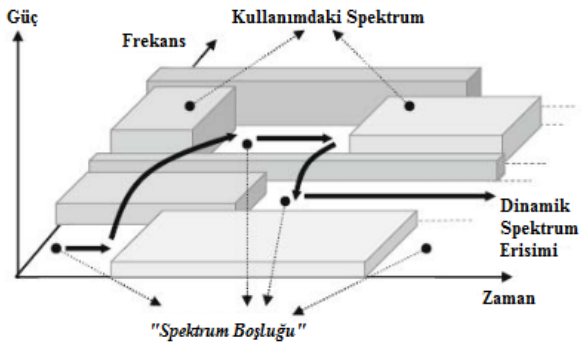
Bu tez, şu şekilde devam etmektedir: 2. Bölüm'de Bilişsel Radyolar hakkında genel bilgiler, 3. Bölüm'de problemin tanımı, 4. Doğa Esinli Sezgiseller, 5. Bölüm'de Üst Sezgiseller, 6. Bölüm'de önerilen çözüm yöntemi, 7. Bölüm'de testler ve testlerin sonuçları anlatılmıştır. Son olarak 8. Bölüm'de sonuçlar ve öneriler yer almıştır.

2. BİLİŞSEL RADYOLAR

2.1 Motivasyon

Kablosuz iletişimdeki hızlı büyüme sonucunda hem lisanslı hem de lisanssız frekans spektrumundaki talep giderek artmaktadır. Son yapılan çalışmaların sonuçlarına göre, sabit spektrum atama politikası, spektrum kullanımının çok zayıf kalmasına sebep olmaktadır. Bu sorunu çözmek için BR teknolojisi, "Beyaz Boşluk" ya da "Spektrum Boşluğu" da (Spectrum hole) denilen, işgal edilmemiş spektrum bantlarının kesikli periyotlarına erişimi sağlayabilmek adına iyi sonuçlar vermeye başlamıştır.

Spektrumun kullanım oranı, lisanssız kullanıcıların, spektrumun lisanslı kullanıcılar tarafından geçici olarak kullanılmadığı zaman dilimlerinde, dinamik olarak spektrum boşluklarını kullanmalarına imkan sağlayarak kayda değer derecede iyileştirilebilir.



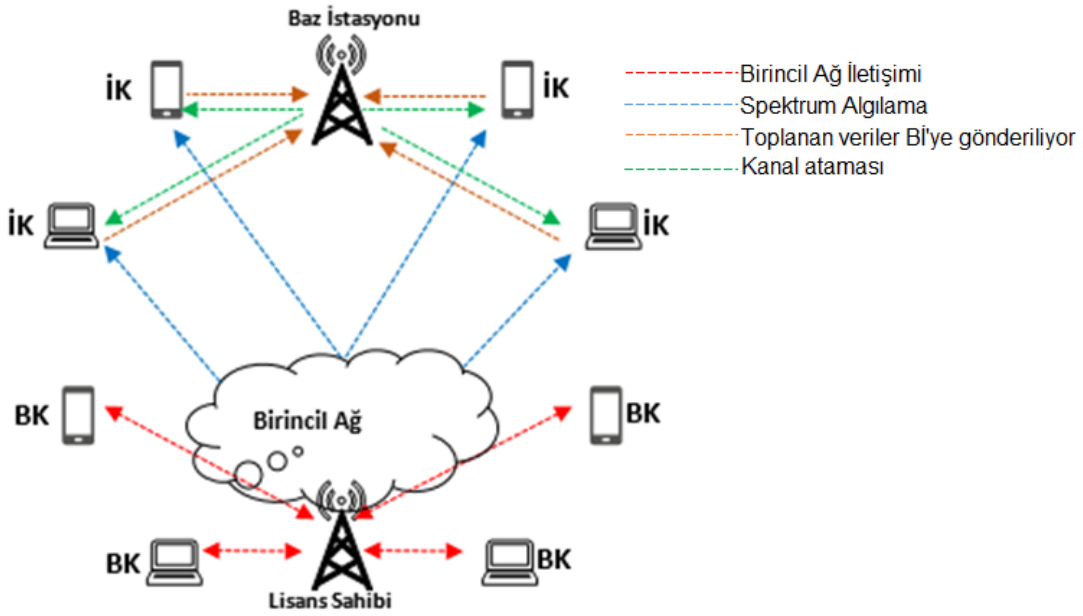
Şekil 2.1: Spektrum boşluğu

Spektrum Boşluğu, Şekil 2.1'de de gösterildiği üzere, normalde lisanslı kullanıcıya atanmış bir bandın belirli zaman aralıklarında ve belirli coğrafi konumlarda kullanılmamasında oluşan boşluktur. Spektrum Boşluğu kavramı daha genel şekilde tarif edilmek istenirse, radyo spektrum uzayındaki iletime geçebilme fırsatıdır diyebiliriz. Radyo Spektrum Uzayı, konum boyutlarına, varış açısına, frekansa, zamana, enerjiye ve muhtemel diğer özelliklere sahip radyo sinyalleri tarafından işgal edilmiş teorikteki üst uzaydır.

2.2 Bilişsel Radyo Ağları

Geleneksel kablosuz ağlarda sabit spektrum atama politikası spektrum kaynaklarının kaybına neden olur. BR teknolojisi ile bu kullanılmadan yok olan spektrum kaynakları kullanılabilir hale getirilebilir.

Bir BRA temel olarak birincil ağlar ve ikincil ağlardan oluşur [1]. Normalde, birincil ağlar, İK'lar ile spektrum paylaşımı yapmazlar. Hatta, böyle bir özellikleri de yoktur. Diğer taraftan, ikincil ağların, kanalları İK'lara atamalarını sağlayan bir Bİ'si vardır. Literatürde bir çok BRA çeşidi vardır [4]. Bu çalışmada, Merkezi BRA'lar (Centralized CRN) (MBRA) üzerinde durulmuştur.

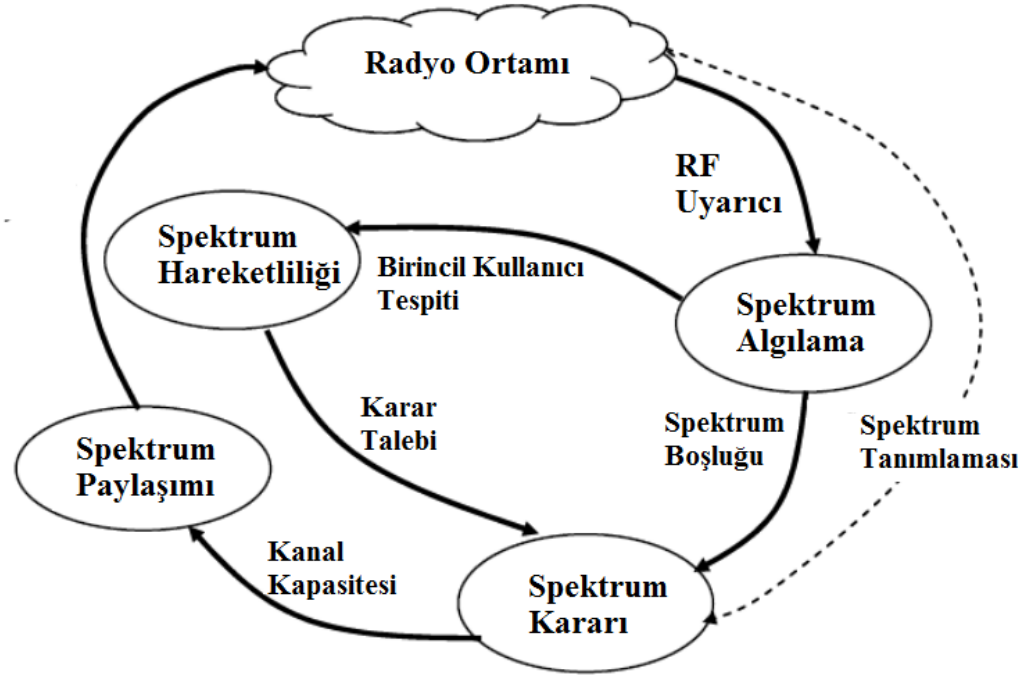


Şekil 2.2: Merkezi bilişsel radyo ağı

Şekil 2.2'de basit bir MBRA gösterilmiştir. Merkezi BRA'da kararları verip kanalları İK'lara atayan bir Bİ bulunur. MBRA'nın avantajı, ağ üzerinde global bir hakimiyetinin olması ve böylece çakışmaları önleyebilmesidir. Diğer yandan, iki büyük dezavantajı vardır: Eğer Bİ bir şekilde çökerse, İK'lar kendi kendilerine kanalları kullanmayı dener ve böylece hem BK'lar ile İK'ların arasında çakışmalar olur hem de İK'ların kendi aralarında çakışmalar meydana gelir.

2.3 Bilişsel Radyolarda Bilişsel Döngü

Bilişsel Radyolar'ın iş sırası Bilişsel Döngü (Cognitive Cycle) denilen bir kavram ile tanımlanmıştır. Bilişsel Döngü'nün adımları; spektrum algılama, spektrum kararı, spektrum paylaşımı ve spektrum hareketliliğidir. Bu döngü Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Bilişsel radyolarda bilişsel döngü

Spektrum algılama (spectrum sensing), bilişsel radyoların kendi kapsama alanlarını ve coğrafi çevresini izleyip diğer lisanslı ve lisanssız kullanıcıları tespit etmekle beraber muhtemel spektrum boşluklarını yakalaması sürecidir. Spektrum algılama bir tek ve birden fazla bilişsel radyo tarafından yapılabileceği gibi, bağımsız olarak algılama yapan birden fazla bilişsel radyonun birbirleriyle bilgi paylaşımı yaparak işbirlikli çalışmasıyla da yapılabilir.

Spektrum kararı (spectrum decision), spektrum algılamanın verdiği bilgilere göre spektrumu ne zaman kullanmaya başlayacağı, bu kullanımın frekansını ve bunlarla ilgili bazı teknik parametrelerle ile ilgili karar vermesi olayıdır. Bilişsel radyoların birincil amacı, lisanslı kullanıcıları rahatsız etmeden (çakışma yaşanmadan) olabildiğince veri iletişimi yapmaktır. Ek olarak, bilişsel radyolar işlemlerini güçlendirmek adına düzenleyici veritabanından (regulatory database) ya da politika veritabanından (policy database) veri kullanabilirler.

Spektrum paylaşımı (spectrum sharing), müsait spektrum boşluklarını kullanmak için ortamda birden fazla lisanssız kullanıcı bulunduğu sırada, bilişsel radyoların kendilerine lazım olan bilgi aktarımını yapması ve yardımcı olmak amaçlı da kendisinde bulunan kaynakları diğer bilişsel ve bilişsel olmayan radyolarla paylaşmasıdır. Bu paylaşım işlemi, radyo ortamında bilişsel radyo davranışlarını belirleyen politika kuralları (policy rules) ile yapılır.

Spektrum hareketliliği (spectrum mobility), eğer lisanslı kullanıcı hattı kullanmaya başlarsa, bilişsel radyonun kendi işlemini durdurması ya da o an kullandığı spektrumu boşaltması ve radyo frekansını değiştirmesidir. Lisanslı kullanıcıyı rahatsız etmekten kaçınmak için, bu işlem gerçek zamanlı çalışmalıdır, bu nedenle bilişsel radyo sürekli olarak olası alternatif spektrum boşluklarını araştırmak zorundadır.

Bu tezde, spektrum algılama kararının elimizde olduğunu varsayıp bu veriler ışığında birden fazla İK'yı, birden fazla kanala atayabilmek için bir çözüm yöntemi öneriyoruz. Bunu yapabilmek için, yukarıda bahsedilen dört evreden üç tanesinin kuralları göz önünde bulundurulmalıdır.

2.4 Geleneksel Kablosuz Ağlarda Kanal Ataması

Kanal ataması, optimal kanal kullanım oranını elde etmek için kanalların, radyo arayüzlerine haritalanması ve bunu yaparken kanal çakışmalarının önüne geçilmesi anlamına gelmektedir. Kanal ataması, haritalama yönünden genelde üç şekilde incelenir: (a) sabit [5, 6], (b) dinamik [7, 8] ve (c) hibrid [9]. Sabit kanal atamasında, kanalların konfigürasyonu sabitken, dinamik kanal atamasında, kanal haritalaması değişen çevre ağ koşullarına göre sürekli olarak güncellenmelidir. Hibrid de ise bazı arayüzleri sabit konfigüre ederken, geri kalanlarını ise dinamik olarak konfigüre eder.

Kanal ataması, ayrıca gerçekleme temeline göre de sınıflandırılabilir: (a) merkezi (centralized) [10, 11], (b) dağıtık (distributed) [12, 13], ve (c): ayrıştırılmış (decentralized) [14]. Merkezi kanal ataması algoritmalarında, merkezi bir düğüm (baz istasyonu), düğümlerden bağlantı bilgilerini ve kanalları toplar. Toplanmış bu bilgiler, kanal haritalamasını belirlemek için merkezi kanal ataması algoritmasının uygulanmasında kullanılır. Sonrasında, bulunan sonuçlar kablosuz ağda bulunan diğer düğümlere gönderilir. Dağıtık kanal ataması algoritmalarında, her düğüm kendi yerel

bilgilerine göre en uygun kanalları hesaplar. Bu tip kanal ataması "dalga etkisi" problemi [15, 16] ve kanal osilasyonu [17] problemi ile karşılaşabilir. Dağıtık bir kanal ataması sadece yerelden topladığı bilgilerle çalıştığı için optimal bir kanal haritalaması üretmeyebilir. Ayrıştırılmış kanal ataması algoritmaları hem merkezi hem de dağıtık sistemlerin avantajlarını elde etmek için geliştirilmiştir. Ayrıştırılmış bir kanal ataması, merkezi anlamda kümeler arası kanal atamasını yapması için bir küme başı (cluster head) kullanan kümeleme temelli (cluster-based) kablosuz ağlarda kullanılır. Küme başı, kümeler arası kanal atamasını hesaplamak için küme içindeki tüm düğümlerin bilgilerini kullanır. Daha sonra, küme başı, dağıtık anlamda, komşu küme başları ile bağlantıların bilgilerini kullanarak küme içi kanal atamasını hesaplar.

2.5 Bilişsel Radyo Ağlarında Kanal Atama Algoritması

BRA'da kanal ataması, çakışma durumlarına bakıldığında geleneksel kablosuz ağlarından farklılık gösterir. BRA'da performansı maksimize etmek için en önemli işlerden birisi İK'lar arasındaki çakışmaları ve aynı şekilde İK'lar ve BK'lar arasındaki çakışmaları minimize etmektir. Kanal ataması algoritması, aynı kanalda çalışan BK ile çakışma olmasını önleyecek şekilde, en uygun kanalı, en uygun İK'ya belli kriterleri göz önünde bulundurarak atama yapar. Bu kriterler, adil kullanım (fairness), spektrum kullanım oranı (spectrum utilization) ve iletimdir (throughput). BRA'larda, spektrum boşlukları ve müsait frekanslar geçici ve uzamsaldır [18]. Bu problemler, BRA'lardaki kanal ataması problemini, geleneksel kablosuz ağlarda olanlardan daha karmaşık hale getirirler; yani NP-Complete bir problem olur [19, 20]. Ayrıca, genel anlamda, BRA'larda kanal ataması dinamiktir. Eğer kanal ataması sabit olursa, BRA'lar BR teknolojisinin tüm avantajlarını kullanamazlar.

2.6 Çözüm Yöntemleri

BRA'larda kanal ataması çözüm yöntemleri, genel olarak oyun teorisi, doğrusal programlama (DP), doğrusal olmayan programlama (DOP), sezgiseller ve Markov Rastgele Alan'dır.

Oyun teorisi [21, 22], belirli bir hedefe yönelik karar verme gücüne sahip birimlerden oluşan sistemleri incelemekte kullanılan matematiksel bir yöntemdir. Bir BRA'da, kanal ataması problemi oyun teorisi kullanılarak formüle edilebilir. Oyun

teorisi temelli bir kanal atama algoritmasının amacı kanal ataması problemi için pareto-optimal bir sonuç bulmaktır.

DP, lineer bir amaç fonksiyonunu optimize etmek için, lineer eşitlik kısıtlarını ve lineer eşitsizlik kısıtlarını göz önünde bulunduran bir tekniktir. DP'de problemin formüle edilmesi çok kolaydır. BRA'larda bazı güncel kanal atama algoritmaları problemi formüle etmek için İkili DP (İDP) ve Karışık Tamsayı DP (KTDP) kullanırlar.

DOP, eşitlik ve eşitsizlik kısıtları içeren ve amaç fonksiyonu ya da bazı kısıtları doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır.

Sezgiseller, var olan yöntemler yetersiz kaldığında problemleri hızlı bir şekilde çözen tekniklerdir. Ancak, sezgisel tabanlı çözümler olası çözümler içerisinde bulunan en iyi sonucu garanti etmez.

Sezgiseller, üç farklı tip olarak sınıflandırılabilirler: Doğal Sezgiseller (Native-Heuristics), Üst Sezgiseller (Hyper-Heuristics) (ÜS) ve Meta-Sezgiseller (Meta-Heuristics).

Doğal sezgiseller, basit sezgisellerdir. ÜS'ler makina öğrenmesi teknikleri kullanan birden fazla düşük seviyeli sezgiselin (DSS) birlikte çalışarak optimizasyon yaptığı bir tekniktir. ÜS, problemin kendisini bilmez, sadece gelen geri bildirimlere göre DSS'lerden yeni bir çözüm adayı üretir. Üretilen bu çözüm adayının içindeki sıraya göre de DSS'ler problemi çözer.

Meta-sezgisel teknikler, kanal ataması problemini iteratif olarak arama uzayını taramak için çeşitli alt teknikleri zekice birleştirerek çözerler. Ayrıca, en yakın optimal sonuca ulaşmak için öğrenme stratejileri kullanırlar. Bu teknikler, basit sezgiseller yerel-optimumda sıkışınca kullanılırlar. Ayrıca, çok hızlı bir şekilde arama uzayında iyi sonuçların çevresine yaklaşabilirler.

Markov Rastgele Alan tabanlı kanal ataması algoritmaları bir rastgele değişkenler kümesini tanımlamak için yönsüz bir çizge gerçeklerler.

3. PROBLEMİN TANIMI

3.1 Literatür Taraması

[23]'te Hoang *ve diğerleri* fırsatçı spektrum erişimi sağlayan ve iki fazlı kanal/güç atama planı oluşturabilen bir kanal ataması ve güç kontrol algoritmasını spektrum kullanım oranını maksimize etmek için önermişlerdir. Bilişsel ağın her bir üyesinin ya aktif ya da beklemede olduğunu varsayarak KTDP problemini çözmek için bir çakışmalar çizgesi kullanmışlardır. Bu ağda sadece aktif üyeler iletim talebinde bulunabilir. Radyo frekans spektrumu çoklu ortogonal kanallara bölünmüştür ve ortogonal frekans bölümlerini BK'lar ve İK'lar arasında paylaştırıp aynı anda kullanmalarına olanak sağlamışlardır.

Algılama performans gerekliliklerini karşılayan müsait kanal sayısını artırmak için İK'lar arasında işbirlikli spektrum algılamanın kanal ataması için [24]'te merkezi bir algoritma önerilmiştir. Algoritma, her bir İK'dan, tüm birincil kanallardan gelen sinyal-gürültü oranlarını da (SGO) içeren bilgileri temel alarak çalışır. Daha sonra, açgözlü yaklaşım kullanan bir algoritma, İK'lardan Bİ'ye gönderilen raporlama sayısını düşürmek için çalıştırılır. Algoritma, aşırı iletişim durumunu da hesaba katmaktadır. Ancak, sinyal-gürültü oranı kanal seçimi için iyi bir seçenek değildir çünkü oldukça dinamiktir ve bu yüzden önerilen çözüm yöntemi sık SGO değişimlerine iyi ayak uyduramamaktadır. Dahası, kanal seçimi için BK'ların geçmiş aktivitelerini de dikkate almamaktadır. Son olarak, algoritma İK'ların farklı gerekliliklerini dikkate almamaktadır.

Sinyal aşırı yüklenmesini azaltmak için [25]'te iki adımlı birleşik kanal ataması ve yönlendirme güncelleme algoritması önerilmiştir. İlk başta, her bir İK düğümü, BK kanala erişmeye çalıştığında kontrol bilgisi alış verişi yapmadan basit bir kurtarma algoritması çalıştırır. BRA, sadece kurtarma algoritması başarısız olursa kanal atamasını ve yönlendirmeyi yeniden optimize eder. Algoritma, kanal kullanım oranını

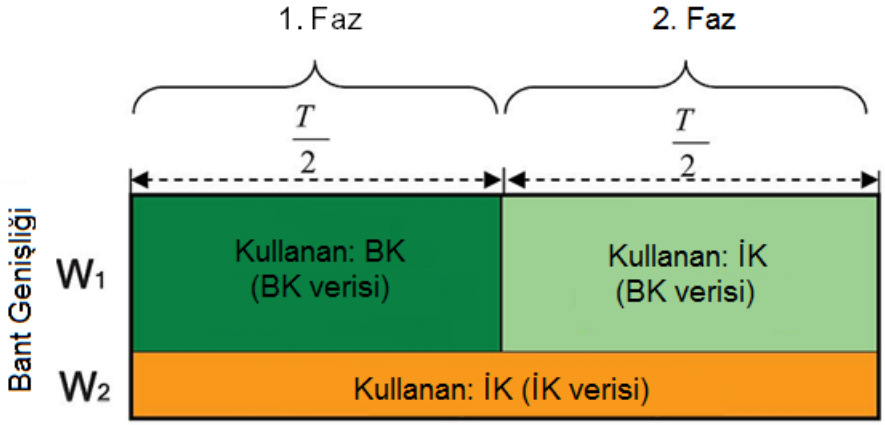
maksimize eder ve bir kanaldaki BK aktivitesini dikkate alarak kanal değiştirme sayısını minimize eder.

3.2 Kanal Atama Problemi

Kanal Atama Problemi (KAP), BRA'larda çakışmaları önlemek için kullanılan temel bir tekniktir. KAP'ın amacı kanal kullanım oranını maksimize etmek için kanalların İK'lara atanmasıdır. KAP'ta, kanal kullanım oranı, İK'ya ait veri ile BK'ya ait veri aynı anda iletime geçirilerek artırılabilir [26].

Önerdiğimiz çözüm yönteminde KAP'ı çözmek için ÜS'leri kullandık. Literatürde, Kanal Ataması algoritmaları, kanal kullanım oranını maksimize etme, çakışmaları minimize etme, ağ yoğunluğunu minimize etme, iletimi maksimize etme gibi çeşitli amaç fonksiyonlarını optimize etmeye çalışır [4]. Bu çalışmada bizim amaç fonksiyonumuz ise kanal kullanım oranını artırmaktır.

Bu çalışmada, [26]'da önerildiği gibi İK'ların ve BK'ların eş zamanlı olarak iletime geçebildiği bir BRA modeli kullanıldı. İK ve BK'nın aynı anda iletim yapabilmesini sağlayan protokol Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, BK kendisine ait olan Bant Genişliği'nden (BG) bir kısmını İK için boş bırakıp, İK'nın, BK'ya ait bir kısım veriyi iletmesini talep eder. Böylece BK, iş yükünü azaltmış olup enerjiden tasarruf etmiş olur.



Şekil 3.1: BK ve İK için zaman-BG ataması

Eş zamanlı aktarımda İK'ların BK'lara ait spektrum bantlarını, ancak BK'ların izin verdiği kadarıyla kullanabileceğinin unutulmaması gerekir. Örnek olarak, toplam kullanılabilir kanal kullanım oranı 1.0 ise ve o kanalın sahibi olan BK da 0.4 oranında kanalı kullanıyorsa, bir İK, kanalı 0.6 oranında kullanabilecektir. Şekil 3.2'de BK'lara

ait örnek bir kanal kullanım oranı tablosu görülmektedir. Hücreler içindeki değerler BK'ların her bir zaman birimi için BG kullanımlarını temsil etmektedir. Örneğin, t_0 anında CH_2 ve CH_4 kanallarının kullanım oranları sırasıyla 0.52 ve 0.7 iken ve diğerlerinde de bir hareketlik yoktur yani kanal o an kullanılmamaktadır. Bu, bir İK'nın CH_1 ve CH_3'ü full olarak kullanabileceğini, CH_2 ve CH_4'ü ise sırasıyla 0.48 ve 0.3 oranlarında kullanabileceği anlamına gelmektedir.

	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{15}	t_{16}	t_{17}	t_{18}
CH1	0	0	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
CH2	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0	0	0	0	0	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
CH3	0	0	0	0	0	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0	0	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0
CH4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0	0	0	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74

Şekil 3.2: Örnek spektrum kullanım oranları

Bu çalışmada çözdüğümüz KAP'da ana hedef her zaman aralığı için İK'ların kanallarda boşta kalan BG kadar spektrumu kullanmasını sağlayarak kanal kullanım oranını maksimize etmektir. Bu problem için önerdiğimiz amaç fonksiyonu Denklem 3.1'de ve bu amaç fonksiyonuna ait sınırlılık Denklem 3.2'de gösterilmiştir.

$$maksimize \sum_{j=1}^{n} \left[istek(N_j) + \sum_{i=1}^{r} (kullanim(M_i).x_{ji}) \right] \tag{3.1}$$

kısıtlar

$$0 \leq istek(N_j) + kullanim(M_i) \leq 1 \tag{3.2}$$

Yukarıda, n toplam İK sayısını, r toplam kanal sayısını (aynı zamanda toplam BK sayısını), $istek(N_j)$ j'ninci İK'nın BG istek miktarını, $kullanim(M_i)$ i'ninci BK'nın kanal kullanım oranını, x_{ij} ise kanal M_i'nin İK N_j'ye atanıp atanmadığını gösteren 0/1 karar değişkenini göstermektedir.

4. DOĞA ESİNLİ SEZGİSELLER

Doğa Esinli Sezgiseller (Nature Inspired Heuristics) (DES), gerçek doğadaki bazı olaylar ve onların işleyişinden esinlenilmiş mekanizmalardır. DES'lerin son yıllarda popülerleşmesinin sebebi, bir çok optimizasyon probleminin oldukça karmaşık olmasıdır. Farklı DES'ler sürekli olarak yayınlanmakta ve bunların bazıları da oldukça yüksek kalitede sonuçlar vermektedirler.

Literatürde bulunan bir çok DES iki sınıf altında toplanabilir:

1. Tek noktadan başlayan arama teknikleri
2. Bir çok noktadan başlayan arama teknikleri

Birinci grup içerisindeki en çok kullanılan metotlar arasında Isıl İşlem Algoritması (Simulated Annealing) [27], Tabu Araması (Tabu Search) [28] ve Açgözlü Rastgele Adaptif Arama Prosedürü (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) [29] algoritmaları gelir.

İkinci grupta ise Evrimsel Algoritmalar (Evolutionary Algorithms) [30], Sürü Zekası Algoritmaları [31] (Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) (Ant Colony Optimization) [32], Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) (Particle Swarm Optimizasyonu) [33] vs.) ve Yapay Bağışıklık Sistemi (Artificial Immune System) [34] teknikleri bulunur.

Optimizasyon problemlerinde, problemi çözmek için kullanılan yapılara aday çözüm denir. Arama algoritmalarını sınıflandırmanın bir yolu, bir problem için kullanılan aday çözümlerin nasıl üretildiğine bakmaktır: i) Eğer bir aday çözüm, bir başka aday çözümden türetiliyorsa buna *bozucu arama algoritması* (perturbative search algorithm) denir. ii) Eğer bir aday çözüm iteratif olarak sıfırdan üretiliyorsa, buna da *yapıcı arama algoritması* (constructive search algorithm) denir. Bu teknikte, algoritma her bir çözüm parçasını iteratif olarak çözüm kümesine ekler ve böylece aday çözümü üretir. KKO en iyi bilinen yapıcı arama algoritmasıdır.

Yukarıda bahsedilen DES'ler arasından, bu tezde KAP'ı çözmek için KKO'nun bir türevi olan Adaptif İteratif Yapıcı Arama (AİYA) (Adaptive Iterated Construction Search) algoritması ÜS mekanizması olarak kullanıldı.

4.1 Karınca Kolonisi Optimizasyonu

KKO [32], en çok kullanılan sürü zekası tekniklerinden biridir ve gerçek karıncaların davranışlarından esinlenilmiştir. KKO yönlendirme problemleri, atama problemleri, zamanlama ve sıralama problemleri ve altküme problemleri gibi bir çok katışımsal optimizasyon problemlerine oldukça başarılı bir şekilde uygulanmıştır [32].

Temel KKO algoritmasının sahte kodu Algoritma 1'de gösterilmiştir.

Algoritma 1: Temel KKO Algoritması

```
KKO parametrelerini kur;
feromon seviyelerini belirle;
while durma kriteri sağlanana kadar do
    for her karınca k için do
        rastgele bir başlagıç düğümü seç;
        repeat
            karar mekanizmasına göre sonraki düğümü seç;
        until aday çözüm tamamlanana kadar;
    feromon tablosunu güncelle;
```

Her iterasyonda, her bir karınca bir sonuç üretir. Karıncalar rastgele bir çözüm elemanından başlar ve iteratif olarak başka çözüm elemanlarını da çözüm kümesine ekleyerek devam eder. Her bir çözüm elemanı için, eklenecek bir sonraki çözüm elemanı, o anki çözüm elemanı ile gidilecek olan çözüm elemanı arasındaki feromon seviyesine ve sezgisel bilgisine dayalı olarak karar veren stokastik bir yerel karar verme politikası ile belirlenir. Bir k karıncası gideceği bir sonraki çözüm elemanını Denklem 6.5'te gösterildiği gibi hesaplanan bir p olasılık değeri ile belirler.

$$p_{ij}^{k} = \begin{cases} \dfrac{\tau_{ij}^{\alpha}\eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_{il}^{\alpha}\eta_{ij}^{\beta}} & \text{eğer } j \in N_i^k \\ 0 & \text{eğer } j \notin N_i^k \end{cases} \tag{4.1}$$

Yukarıda, τ_{ij} çözüm elemanları arasındaki feromon seviyesini, η_{ij} çözüm elemanları arasındaki sezgisel bilgilerini, α ve β sırasıyla feromon seviyesi ile sezgisel

bilgilerinin etkilerini belirlemek için kullanılan parametreleri ve N_i^k da, k karıncası düğüm i'de iken k karıncasının gidebileceği komşularını göstermektedir.

Tüm karıncalar tamamlanmış bir çözüm adayı ürettiğinda feromon seviyeleri güncellenir. Önce, feromon seviyeleri sabit bir basit kesir ile çarpılarak eritilir. Daha sonra da karıncaların izlediği yollardaki feromon seviyeleri de yükseltilir. Feromon eritme ve güncelleme işlemleri Denklem 6.6'da ve Denklem 6.7'de gösterildiği gibidir:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1-\rho)\tau_{ij} \tag{4.2}$$

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \sum_{k=1}^{m} \Delta\tau_{ij}^k \tag{4.3}$$

Yukarıda, m toplam karınca sayısını, ρ feromon erime oranını ve $\Delta\tau_{ij}^k$ ise karınca k'nin çözüm adayını oluştururken kullandığı çözüm elemanlarının arasındaki toplam feromon miktarını göstermektedir. $\Delta\tau_{ij}^k$ Denklem 4.4'te gösterilmiştir. Denklemdeki C_k, k'ninci karıncanın oluşturduğu çözüm T_k'nın maliyetini göstermektedir.

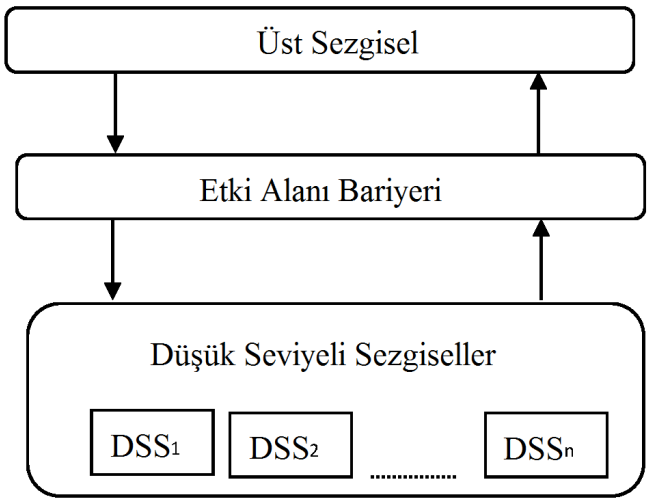
$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} 1/C_k & \text{eğer } yol(i,j) \in T_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{4.4}$$

4.2 Adaptif İteratif Yapıcı Arama

AİYA, KKO'nun tek karınca ile uygulanmış farklı bir formudur [35]. KKO'da olduğu gibi AİYA'da da karınca bir çözüm adayı oluşturur ve sonraki iterasyon için feromon tablosunu günceller. Bu çalışmamızda, AİYA'yı bir ÜS mekanizması olarak kullandık. ÜS'ler ile ilgili genel bilgileri verdikten sonra uygulanma biçimini ileriki bölümlerde detaylıca anlatacağız.

5. ÜST SEZGİSELLER

Üst Sezgiseller, 1960'lardan [36] beri zaman zaman bahsi geçmiş olsa da oldukça yeni sayılır. Buradaki ana fikir, bilinen sezgiselleri derecelendirme yöntemiyle birleştirerek problemleri çözmek için yeni algoritmalar üretmektir. Üst sezgiseller, sezgisellerin arama uzayında çalışan metotlardır. Birçok problem kapsamlı arama (exhaustive search) ile çözülemez ya da çok fazla zaman alır. Bu tip problemlerde insanlar *sezgisel arama* metotlarına yönelirler. Sezgisel aramalar kesin olarak en iyi sonucu vermese de optimum seviyedeki bir sonucu çok kısa süre içerisinde bulurlar. Bunlardan bazıları; yerel arama (local search), Evrimsel Algoritmalar ve KKO algoritmalarıdır. Ancak bu algoritmalar her zaman en iyi sonucu vermeyebilir. Problemin şekline ve türüne göre bu algoritmalardan bir tanesi, aslında diğerine göre çok daha iyi olabilir. İşte üst sezgiseller alanındaki çalışmalar bu bahsedilen problemleri ortadan kaldırmak için artmıştır. Buradaki asıl amaç, bir problemler bütününü çözmek için hızlı, makul, anlaşılabilir, kalite açısından güvenilir, tekrarlanabilirlik ve problemin kapsamına göre iyi bir kötü-durum (worst case) davranışı sergileyen bir algoritma üretmektir.



Şekil 5.1: Üst sezgisel yapısı.

Üst sezgiseller, DSS'ler ile aralarında bulunan bir etki alanı bariyeri ile problemden bağımsız hale gelir. Bu yapı, Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Yapıya bakıldığında, ÜS

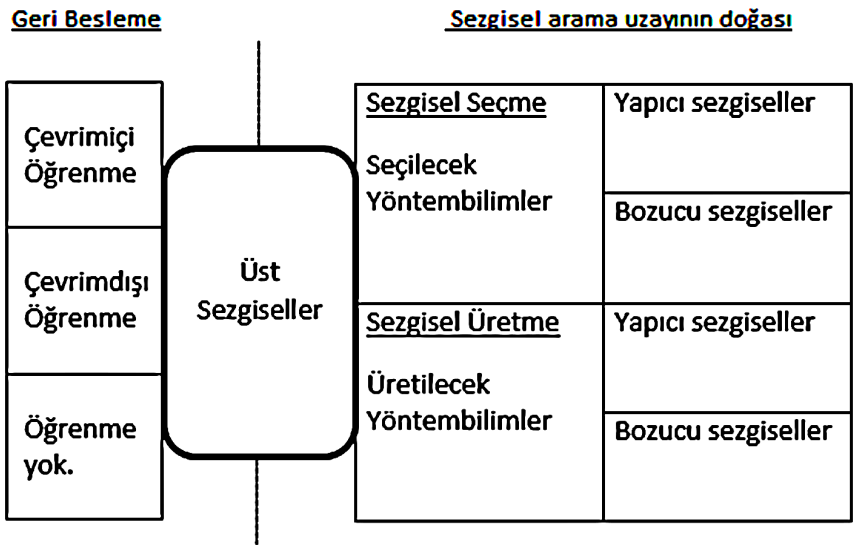
mekanizmasının sadece DSS'lerin arama uzayında çalıştığı görülür. Böylece, problem ne olursa olsun, ÜS mekanizmasında herhangi bir güncelleme yapmaya gerek kalmaz.

Günümüzde bir çok optimizasyon algoritması durağan optimizasyon problemleri için geliştirilmiştir. Ancak, bir çok gerçek dünya problemi doğada dinamiktir. Dinamik ortam problemlerini çözmek için şimdiye kadar bir çok yöntem denenmiş ve belli sonuçlar alınmıştır. Ancak, bu yöntemlerin de bazen ortamın durumuna göre birbirlerinden daha iyi oldukları anlar görülmüştür. İşte bu noktada, üst sezgiseller, yani "sezgisel seçen sezgisel" teknikler devreye girer. Literatürde iki ana üst sezgisel çeşidi bulunmaktadır: Bunlar, *seçim* ve *üretim* üst sezgiselleridir.

5.1 Üst Sezgisellerin Sınıflandırılması

Üst sezgiseller sınıflandırılırken Şekil 5.2'deki diyagram [37] kullanılmıştır. Şekle göre üst sezgisellerin sınıflandırılmasında iki boyut söz konusudur: (i) Sezgisel arama uzayının doğası ve (ii) farklı geri besleme kaynakları. Sezgisel arama uzayının doğasına baktığımızda iki tür üst sezgisel görürüz. Bunlar; *seçim sezgiselleri*, yani önceden var olan sezgisellerden birini seçme ve *üretim sezgiselleri* yani var olan sezgisellerin donanımlarını kullanarak yeni bir tane sezgisel oluşturan yöntembilimdir. Bu iki yöntembilimin alt seviyelerine baktığımızda ise yapıcı (construction) ve bozucu (perturbation) sezgisellerini [35] görürüz. Bozucu yöntemler, tüm aday çözümleri dikkate alarak ve onların bir veya daha fazla çözüm bileşenlerini değiştirerek çalışırken, yapıcı yöntemler ise bir veya daha fazla çözüm bileşeni eksik olan aday çözümleri kısmi olarak göz önüne alır ve iteratif olarak bunları geliştirir.

Üst sezgisellerin dinamik ortamlarda verimli olabilmesi için ortamdan geri bildirim alması gerekir. Bir üst sezgisel, eğer ortamdan geri bildirim alıp bir sonraki hamlesini buna göre yapıyorsa, bu artık ayrıca bir öğrenme algoritması da olur. Öğrenme sırasında kullanılan geri bildirimin kaynağını dikkate aldığımızda, öğrenmeyi *çevrimiçi* ve *çevrimdışı* olarak ikiye ayırabileceğimizi görürüz. Çevrimiçi modelde, öğrenme, algoritmanın koşturulması sırasında çalışırken, çevrimdışı modelde ise bir grup sınama örneğinden belli kurallara göre bilgi toplanır ve böylece gelecekte karşılaşılacak olan problemlerin çözülmesi beklenir.



Şekil 5.2: Üst sezgisellerin sınıflandırılması.

5.2 Seçim üst sezgiselleri

5.2.1 Yapıcı sezgisellere dayalı yaklaşımlar

Bu yaklaşımlar, çözümü aşamalı olarak geliştirirler. Boş bir çözüm ile başlayan süreç, yapıcı sezgiselleri zekice seçerek ve kullanarak tam bir çözüm elde etmeyi amaçlar. Üst sezgiseller yapısı önceden var olan DSS'lerden, o anki problem için en uygun olanı seçer. Bu süreç optimal bir çözüm bulunana kadar devam eder. Anlaşılacağı üzere optimal sonucun elde edilmesi, problemin doğal sonucunun elde edilmesi demektir. Bu nedenle sezgisel seçimlerinin sırası sonludur.

5.2.2 Bozucu sezgisellere dayalı yaklaşımlar

Bu yaklaşımlar, rastgele ya da basit yapıcı bir sezgisel ile bulunmuş bir tam çözüm ile başlar ve sonrasında iteratif olarak bu çözümü geliştirmeye çalışır. Üst sezgisel yapısı basit yerel arayıcılar ve/veya bir komşuluk yapısı grubu ile sağlanır ve bu yapı iteratif olarak seçilip, o anki tam çözüme uygulanır. Bu süreç, bir sonlandırma şartı gerçekleşene kadar devam eder. Anlaşılacağı üzere bu metot, yapıcı sezgisellere dayalı yaklaşımlardan farklı olarak herhangi bir doğal sonlandırma şartına sahip değildir. Sezgisel seçim sırası, istenirse uzatılabilir. Bu sınıftaki üst sezgiseller farklı kombinatoryal optimizasyon problemlerine çok başarılı bir şekilde uygulanabilir.

5.2.3 Sezgisel seçimi ve kabul etme stratejileri

Çizelge 5.1'de çeşitli sezgisel seçim stratejileri ve kabul kriteri stratejileri görülmektedir. *Rastgele Basit*, (Simple Random) adından da anlaşılacağı gibi, rastgele olarak düşük seviyeli sezgisellerden birisini eşit dağılımlı bir olasılığa göre seçer. *Rastgele İniş*, (Random Descent) düşük seviyeli bir sezgiseli seçer ve daha iyi bir sonuç bulamayana kadar bunu arka arkaya uygular. *Rastgele Permütasyon*, (Random Permutation) en başta düşük seviyeli sezgiselleri bir sıraya koyar ve her adımda bunları belirlenen sıraya göre uygular. *Rastgele Permütasyon İniş*, (Random Permutation Descent) Rastgele Permütasyon ile aynı şekilde çalışır ancak farklı olarak oluşturduğu bu sırayı, yeni bir iyi sonuç almayana kadar tekrar eder. *Açgözlü Yaklaşım*, (Greedy Approach) bütün düşük seviyeli sezgiselleri probleme uygular ve en iyi sonucu vereni seçer. *Seçim Fonksiyonu*, (Choice Function) hem her bir düşük seviyeli sezgiselin performansını hem de başarılı bir şekilde uygulanan düşük seviyeli sezgisel çiftlerini analiz eder. Bu analiz, kalite iyileştirmesi, çalışma zamanı ve genel performansı içerir. *Tüm Hamleler*, (All Moves) adından da anlaşıldığı gibi tüm hamleleri kabul eder. *Sadece İyileştiren* (Only Improving) mekanizma, sadece iyileştiren hamleleri, *İyileştiren veya Eşit Olan* (Improving and Equal) ise sadece kötü alınan sonuçları kabul etmez. Eğer bir sezgiselin dönderdiği sonuç bir öncekinden daha iyi veya buna eşitse, bunu kabul eder.

Çizelge 5.1: Sezgisel seçimi ve kabul kriterleri stratejileri

Etiket	*Strateji adı*	*Yöntem tipi*
RB	Rastgele Basit	Sezgisel Seçimi
Rİ	Rastgele İniş	Sezgisel Seçimi
RP	Rastgele Permütasyon	Sezgisel Seçimi
RPİ	Rastgele Permütasyon İniş	Sezgisel Seçimi
SF	Seçim Fonksiyonu	Sezgisel Seçimi
TA	Tabu Araması	Sezgisel Seçimi
AY	Açgözlü Yaklaşım	Sezgisel Seçimi
TH	Tüm Hamleler	Kabul Kriteri
Sİ	Sadece İyileştiren	Kabul Kriteri
İE	İyileştiren veya Eşit Olan	Kabul Kriteri
MC	Sayaçlı Üstel Monte Carlo	Kabul Kriteri
BT	Büyük Tufan	Kabul Kriteri

Monte Carlo mekanizması ise, tüm iyileştiren hamleler kabul edilecekse önerilir ve iyileşmeyen hamlelerin kabul etme kriteri dinamik olarak değişen Denklem

5.1'deki olasılık fonksiyonu p_t'ye dayanır. *Doğrusal Monte Carlo*, (Linear Monte Carlo) kabul etme olasılığının kötüleşen başarım fonksiyonuna olan negatif doğrusal oranını kullanır. *Üstel Monte Carlo* (Exponential Monte Carlo) ise, Denklem 5.1'de gösterildiği gibi kabul etme olasılığının kötüleşen başarım fonksiyonuna olan negatif üstel oranını kullanır. *Sayaçlı Üstel Monte Carlo* (Exponential Monte Carlo with Counter) ise, normal *Üstel Monte Carlo*'dan farkı, eğer belirli bir iterasyon sayısından sonra halen bir iyileşme yoksa olasılık arttırılır.

$$p_t = e^{-\frac{\frac{\Delta f}{N}}{\frac{1-t}{D}}} \tag{5.1}$$

Yukarıda, Δf, t'ninci iterasyondaki başarım değişimi, D maksimum iterasyon sayısı, N maksimum başarım değişimindeki beklenen aralıktır.

Pratikte, bir çok atama problemlerinde üst sezgisel algoritmaları kabul etme kriteri olarak *Büyük Tufan*, (Great Deluge) sezgisel seçici olarak *Rastgele Basit* kullanırlar. Büyük tufan kabul etme mekanizmasında, arama esnasında her adımda hesaplanan seviye yerine daha iyi ve eşit amaç değeri oluşturulması kabul edilir. Başlangıç seviye aday çözümün objektif değerin eşitlenir. Her adımda, problem seviyesi Denklem 5.2'de gösterildiği gibi beklenen objektif değerin (f_0) doğrusal oranına uyacak şeklinde güncellenir.

$$\Theta_t = f_0 + N.\left(1 - \frac{t}{D}\right) \tag{5.2}$$

Yukarıda, Θ_t, bir minimizasyon probleminde, t'ninci iterasyondaki eşik seviyesi, D maksimum iterasyon sayısı, N maksimum başarım değişimindeki beklenen aralıktır.

5.3 Doğa Esinli Sezgisellerin Üst Sezgisel Olarak Kullanılması

ÜS'ler seçme mekanizmalarına göre [38]'de dört farklı şekilde sınıflandırılmışlardır. Bunlar;

1. Rastgele seçimli üst sezgiseller (Random choice Hyper-Heuristics)
2. Aç gözlü ve hassas üst sezgiseller (Greedy and peckish Hyper-Heuristics)
3. Meta-sezgisel temelli üst sezgiseller (Meta-Heuristics based Hyper-Heuristics)

4. Öğrenme mekanizmalı üst sezgiseller (Hyper-Heuristics employing learning mechanism)

Yukarıdaki sınıflandırmada söylenen meta-sezgisel teknikler, DES'leri de kapsar. Bu teknikte, DES'ler bir ÜS olarak tasarlanır. Bir DES normalde doğrudan çözülecek problem üzerinde çalışırken, ÜS olarak kullanıldığında problem ile değil, DSS'ler üzerinde çalışır. Böylece problemden bağımsız hale gelir.

DES'lerin ÜS olarak kullanılması kendi içerisinde dört farklı şekilde incelenebilir:

1. Popülasyon temelli - Bozucu arama (örnek: GA)
2. Popülasyon temelli - Yapıcı arama (örnek: KKO)
3. Tek bireyli - Bozucu arama (örnek: İİA)
4. Tek bireyli - Yapıcı arama (örnek: AİYA)

Bu tezde, çözüm yöntemi olarak tek bireyli, yapıcı arama metodunu, AİYA algoritması ile gerçekledik.

6. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMİ

KAP'ı çözmek için bu tezde AİYA temelli bir ÜS yaklaşımı kullandık. BK'ların spektrum kullanım oranları hakkında bilgi veren bir trafik matrisi ile, ÜS mekanizması her bir zaman aralığı için kanalları, İK'lara atar. Bunu yapabilmek için, öncelikle ÜS bir grup DSS'den oluşan bir aday çözüm oluşturur. Daha sonra, aday çözüm içerisindeki her DSS, verilen sıra ile bir kanalı bir İK'ya atamak için çağrılır. Atama işlemi tamamlanıp bu döngü kanal sayısı kadar icra edildikten sonra son olarak atamanın başarım değeri hesaplanır.

6.1 Yöntemin Bileşenleri

6.1.1 Çözüm adayı

KAP için Şekil 6.1'de muhtemel bir çözüm adayı gösterilmiştir. Şekilden de görülebildiği gibi, bir DSS bir çözüm adayı içerisinde birçok defa kullanılabilir. Çözüm adayı içerisindeki değerler 1 ve toplam DSS sayısı arasındaki tam sayılardan oluşur. Her bir değer, bir sonraki İK'nın atamasını hangi DSS'nin yapacağını gösterir. Kanal ataması talebinde bulunan *n* tane İK bulunduğu için çözüm adayının uzunluğu toplam İK sayısına, yani *n*'e eşittir.

İndeks:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Değer:	1	1	4	3	5	6	4	2	2	3	1	4	5	4	6

n=15 (Toplam İK sayısı)
m=6 (Toplam DSS sayısı)

Şekil 6.1: Örnek çözüm adayı

Atama işleminin her bir adımında, bir DSS bir İK seçer. Örneğin, 6.1'de ilk DSS birinci ve ikinci İK'ları ataması için seçilmişken, dördüncü DSS ise üçüncü İK'yı atamak için seçilmiştir. Seçilen her bir İK için kanal ataması işlemi *en iyi uyan* (best-fit) politikası ile yapılmıştır. En iyi uyan politikasının amacı, kanalları İK'ların BG isteklerine göre atamak ve böylece kanal kullanımını maksimize etmektir.

6.1.2 Atama tablosu

Atama işlemi tamamlandıktan sonra, oluşturulan atama tablosunun başarım değerleri hesaplanır. Şekil 6.2'de örnek bir atama tablosu görülmektedir. Tablo, 8 İK'lı bir kanal atamasını göstermektedir. Tablodaki her bir sütunun 2. satırı kanalların karşısına düşen 1. satırdaki İK'lara atandığını göstermektedir. Örneğin, beşinci kanal ikinci İK'ya atanmıştır.

İndeks:	1	2	3	4	5	6	7	8
İK:	2	3	5	1	6	4	8	7
Kanal:	5	2	3	1	4	8	9	10

Şekil 6.2: Örnek atama tablosu

6.1.3 İkincil kullanıcı özellikleri

Her bir İK, kendisinin davranışlarını tanımlayan bazı özelliklere sahiptir. Bu tezde, İK'lar için üç farklı özellik kullandık:

1. *BG istek miktarı:* 0 ve 1 arasında bir değerdir. İK'nın iletim yapabilmesi için istekte bulunduğu minimum BG değeridir.

2. *Öncelik seviyesi:* Bilgisayar ağları terminolojisinde genel olarak kabul görmüş olan 3 farklı öncelik seviyesidir. Bunlar, değerleri sırasıyla 0.5, 0.3 ve 0.2 olan altın, gümüş ve bronz seviyelerdir.

3. *Derece:* İK'ların düğüm, etkileşimlerin kenar olarak tanımlandığı bir çizgede, İK'nın sahip olduğu düğüm derecesidir.

6.1.4 Başarım fonksiyonu

KAP'ın amacı kanal kullanımını maksimize etmektir. Bunu başarabilmek için üç kısımdan oluşan bir başarım fonksiyonu tasarladık:

1. *Kullanılmamış BG (c_1):* Kullanılmayan toplam BG miktarıdır. Bu değerin minimize edilmesi gerekir. Böylece, algoritmayı, kullanabildiği kadar BG kullanması için zorlar.

2. *BG taşması (c_2):* Bir kanalın bir İK'ya ataması yapıldıktan sonra mümkün olan BG miktarı aşıldığında ortaya çıkan değerdir. Bu değer minimize edilmelidir çünkü Denklem 3.2'de de belirtildiği üzere, çözümü doğrudan geçersiz çözüm uzayına sokmaktadır. Diğer taraftan, algoritmanın tüm arama uzayını arayabilmesi için geçersiz çözümler arama kademesinde dikkate alınmış ancak final sonucu olarak kabul edilmemiştir.

3. *Atanamamış İK sayısı (c_3):* Spektrumu erişimi isteyip, atanabilecekleri kanallar olmasına rağmen atanamayan toplam İK'ların sayısıdır.

Başarım fonksiyonunun her bir bileşeni en kötü durum senaryosuna göre Denklem 6.1, Denklem 6.2 ve Denklem 6.3'te gösterildiği gibi normalize edildi.

$$c_1 = c_1/\textit{toplam atanmış İK sayısı} \tag{6.1}$$

$$c_2 = c_2/\textit{toplam atanmış İK sayısı} \tag{6.2}$$

$$c_3 = c_3/(G.(\textit{toplam İK sayısı} - \textit{toplam uygun kanal sayısı})) \tag{6.3}$$

Yukarıda, G, İK'ların üç özelliğinden biri olan *öncelik seviyesi* özelliğinde bulunan *altın seviye* için kullanılan değerdir. Yukarıdaki üç bileşene dayanarak toplam başarım fonksiyonu Denklem 6.4'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$basarim(x) = \alpha_1.c_1 + \alpha_2.c_2 + \alpha_3.c_3 \tag{6.4}$$

6.1.5 Düşük seviyeli sezgiseller

Bu tezde, KAP için altı farklı DSS kullandık. Her DSS çağrıldığı zaman bir İK'nın atamasını gerçekleştirir. Tüm DSS'ler için kanal ataması *en iyi uyan* politikası ile gerçekleştirilir. Kullanılan DSS'ler aşağıda listelenmiştir:

1. *Maksimum Derece:* Bu sezgisel, İK'ların düğüm olarak tanımlandığı bir çizgeye dayanarak ataması yapılmamış İK'lar içerisinden derecesi en büyük olanı seçer.

2. *Minimum Derece:* Bu sezgisel, İK'ların düğüm olarak tanımlandığı bir çizgeye dayanarak ataması yapılmamış İK'lar içerisinden derecesi en küçük olanı seçer.

3. *Maksimum İstek:* Bu sezgisel, İK'ları en yüksek istek seviyesine göre seçer.

4. *Minimum İstek:* Bu sezgisel, İK'ları en düşük istek seviyesine göre seçer.

5. *Maksimum Öncelik:* Bu sezgisel, İK'ları en yüksek öncelik seviyesine göre seçer.

6. *Rastgele Seçim:* Rastgele olarak bir İK seçer.

6.2 Önerilen Algoritma

KAP çözümünde kullandığımız AİYA algoritmasına ait sahte kod Algoritma 2'de gösterilmiştir. Bir sonraki DSS'yi seçmek için, feromon seviyeleri kullanılarak hesaplanmış olasılık değerleri baz alınarak EA'da kullanılan *rulet-tekerliği seçim* mekanizması (roulette-wheel selection) [30] kullanılmıştır. Olasılık değerleri hesaplanırken Denklem 6.5'te gösterildiği gibi herhangi bir sezgisel bilgi olmadığı için sadece feromon değerleri baz alınarak hesaplanmıştır [39].

$$p_{ij} = \begin{cases} \dfrac{\tau_{ij}^{\alpha}}{\sum_{l \in N_i} \tau_{il}^{\alpha}} & \text{if } j \in N_i \\ 0 & \text{if } j \notin N_i \end{cases} \tag{6.5}$$

Yukarıda, τ_{ij} çözüm elemanları i ve j arasındaki feromon miktarını, α feromon miktarının etkisini belirleyen bir parametre ve N_i de düğüm i'de bulunan karıncanın gidebileceği komşularını göstermektedir.

Her iterasyonda tamamlanmış bir çözüm adayı oluşturulur ve feromon seviyeleri güncellenir. Feromon seviyeleri güncellemesi iki aşamadan oluşur: İlk olarak, tüm feromon değerleri sabit bir katsayı ile eritilir. İkinci olarak da, karıncanın çözümü oluştururken kullandığı yollar arasındaki feromon seviyeleri de yükseltilir. Feromon eritmeye ve feromon artırmaya ait denklemler sırasıyla Denklem 6.6'da ve 6.7'de gösterilmiştir.

$$\tau_{ij} \leftarrow (1-\rho)\tau_{ij} \tag{6.6}$$

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \Delta(i,j,s) \quad \text{eğer } yol(i,j) \in T \tag{6.7}$$

Yukarıda, $\Delta(i, j, s)$ oluşturulan çözüm adayına ait toplam feromon miktarıdır. Bu değer, eğer $basarim(s) > 0$ ise $Q/basarim$ (Q bir sabit) değerine eşitlenir, değilse çok büyük bir sayıya eşitlenir. Feromon eritme sabiti olan ρ, 0 ile 1 arasında bir değerdir. Son olarak T, ziyaret edilen çözüm elemanları arasındaki yolların kümesidir.

Algoritma 2: AİYA'nın ÜS olarak kullanılması

```
M ← toplam DSS sayısı;
AİYA parametrelerini ve feromon seviyelerini tanımla;
s ← rastgele çözüm adayı;
basarim ← cozumAdayiniKostur(s);
feromon matrisini güncelle;
while durma kriteri sağlanana kadar do
    for her İK için do
        if ilk iterasyon then
            Rastgele bir DSS seç
        else
            olasılık değerlerini hesapla p ← rastgele(0,1);
            if p ≤ 0.1 then
                En yüksek olasılıklı DSS'yi seç
            else
                DSS'lerin olasılık değerleri ile kümülatif bar oluştur
                p ← rastgele(0,1);
                p değerinin düştüğü aralığa göre DSS'yi seç;
        s[i] ← h;
    basarim ← cozumAdayiniKostur(s);
    feromon matrisini güncelle;
```

Önerdiğimiz çözüm yöntemine ait genel algoritma ise Algoritma 3'te gösterilmiştir. Bu çalışmamızda AİYA, ÜS olarak [39]'ta önerildiği gibi kullanılmıştır.

Algoritma 3: Önerilen çözüm yöntemi

```
basarim ← basarimHesapla(rastgele);
for her bir zaman aralığı için do
    s ← AİYA(t, basarim);
    atamaTablosu ← SeçilenDSSleriKoştur(s);
    basarim ← basarimHesapla(atamaTablosu);
```

7. TESTLER VE DEĞERLENDİRME

7.1 Test Ortamının Oluşturulması

Önerdiğimiz çözüm yöntemini test etmek için aşağıdaki 4 parametreyi baz alarak değişik test örnekleri oluşturduk:

1. *Trafik Matrisi*: Ağ paketlerinin geliş zamanlarını üretmek için *Poission dağılımı* kullanılarak trafik matrisi oluşturuldu. Poisson dağılımında $\lambda = 1, 5, 10$ olmak üzere üç farklı λ değeri kullanıldı. Kullanılan λ değeri büyüdükçe paketlerin geliş zamanları seyrekleşir, küçüldükçe de tam tersi olarak paketlerin geliş zamanları sıklaşır. Paketlerin uzunluğunu belirlemek için ise uniform dağılım kullandık. Ancak bunu yaparken paketlerin birbirlerini ezmemesine dikkat ettik.

2. *Paket sayısı*: Testlerimizde 10 ve 20 olmak üzere iki farklı paket sayısı değeri kullandık. Paketlerin BG ise rastgele olarak 0 ve 1 arasında üretildi. Bu BG değerleri, BK'ların kanal kullanım oranını göstermektedir.

3. *Toplam İK sayısı*: Testlerimizi gerçekleştirmek için 4 farklı İK sayısı kullandık (80,100,200,300). İK'ların BG istek miktarları 0 ile 1 arasında rastgele olarak üretildi. Öncelik seviyeleri ise altın, gümüş ve bronz olmak üzere sırasıyla 0.5, 0.3 ve 0.2 olarak belirlendi.

4. *Toplam BK sayısı*: Toplam BK sayısı olarak testlerimizde 60, 80 ve 100 olmak üzere 3 farklı değer kullandık.

Yukarıdaki parametreleri kullanarak toplam 72 adet farklı test örneği oluşturduk.

AİYA parametreleri olan ρ ve Q sabitleri için [39]'ta önerildiği gibi sırasıyla 0.1 ve 1000 değerlerini kullandık.

Başarım değeri hesaplanırken kullanılan $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ katsayılarının değerleri sırasıyla 10, 1000 ve 10 olarak belirlendi.

7.2 Başarım Hesaplaması

Bu tezde, testlerin başarımını iki kriter üzerinden değerlendirdik:

1. *Kanal Ataması Başarım Oranı (KABO)*: Bir test örneği içindeki tüm kanallara yapılan toplam geçerli atama sayısının toplam kanal sayısına bölünmesiyle elde edilen değerdir. Burada, geçerli atama sayısı, Denklem 3.2'de belirtilen sınırlılığın bir kanala ait tüm zaman birimleri için aşılmaması durumudur.

2. *Kanal Doluluk Oranı (KDO)*: Denklem 'de gösterildiği üzere KABO ile ağırlıklandırılmış, kanalların t anındaki doluluk oranıdır.

$$KDO(t) = \frac{\sum_{i=1}^{r} kullanim_i(t)}{r} * KABO \tag{7.1}$$

   Yukarıda, $kullanim_i$ kanal i'nin, t anındaki kanal kullanım oranını ve r de toplam kanal sayısını göstermektedir.

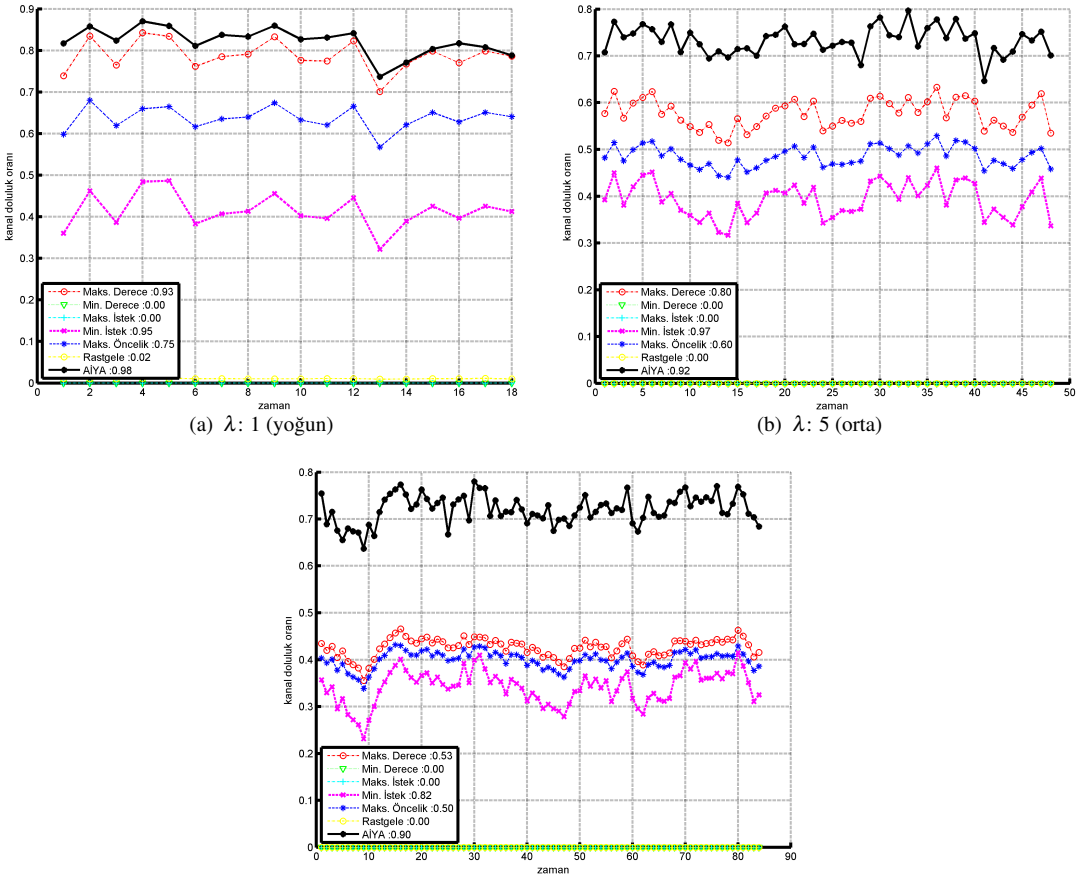
7.3 Test Sonuçları ve Tartışma

Önerdiğimiz 6 farklı DSS kullanan ÜS yaklaşımının etkisini göstermek için, 72 ayrı test örneği hem ÜS algoritmamız ile hem de tüm DSS'ler ile ayrı ayrı çözülmüştür. AİYA stokastik bir algoritma olduğu için, her bir test örneği için algoritmayı 20 kere bağımsız olarak koşturduk. Bu sebeple, sonuç grafiklerimizde AİYA için 20 koşturmanın ortalamasını gösterdik. Sonuçlar *zamana bağımlı ağırlıklandırılmış kanal doluluk oranı* olarak gösterilmiştir. Ancak, tezin bu kısmında test örneklerinden sadece birkaç tanesinin sonuçlarını gösterdik. Geri kalan tüm sonuçlar, bu tezin sonundaki Ekler bölümünde incelenebilir. Seçilen örnekler, her bir parametrenin etkisini gösterecek şekilde seçilmiştir. Bu parametreler, trafik matrisini oluştururken kullanılan λ, toplam kanal sayısı (KS) ve toplam İK sayısıdır. Toplam paket sayısı 20 olarak sabit tutulmuştur. Çünkü, paket sayısının zaman uzunluğunu değiştirmekten başka bir etkisi yoktur. Tüm sonuç grafiklerinde, tüm altı DSS'nin ve önerilen algoritma AİYA'nın sonuçları gösterilmiştir. Grafiklerde, sezgisellere ve AİYA'ya ait sonuçlar KABO değerlerini, dikey eksen KDO değerini ve son olarak yatay eksen de zamanı göstermektedir.

Önerdiğimiz algoritmanın sadece DSS'ler ile karşılaştırılmasının sebebi, daha önceden böyle bir çalışma yapılmamış olmasıdır.

7.3.1 Lamda değerinin etkisi

Bu bölümde, trafik yoğunluğunun performansa etkisini analiz etmek istedik. Bu sebeple toplam kanal sayısını ve toplam İK sayısını sırasıyla 60 ve 300 olarak sabitledik. Şekil 7.1'de farklı λ değerleri için sonuçlar elde ettik. $\lambda = 1$ için paketler arası geliş çok kısa olduğu için yoğun bir trafik matrisi ürettik. Diğer bir deyişle λ değeri arttıkça paketlerin gelişi seyrelmektedir.



(a) λ: 1 (yoğun) (b) λ: 5 (orta)

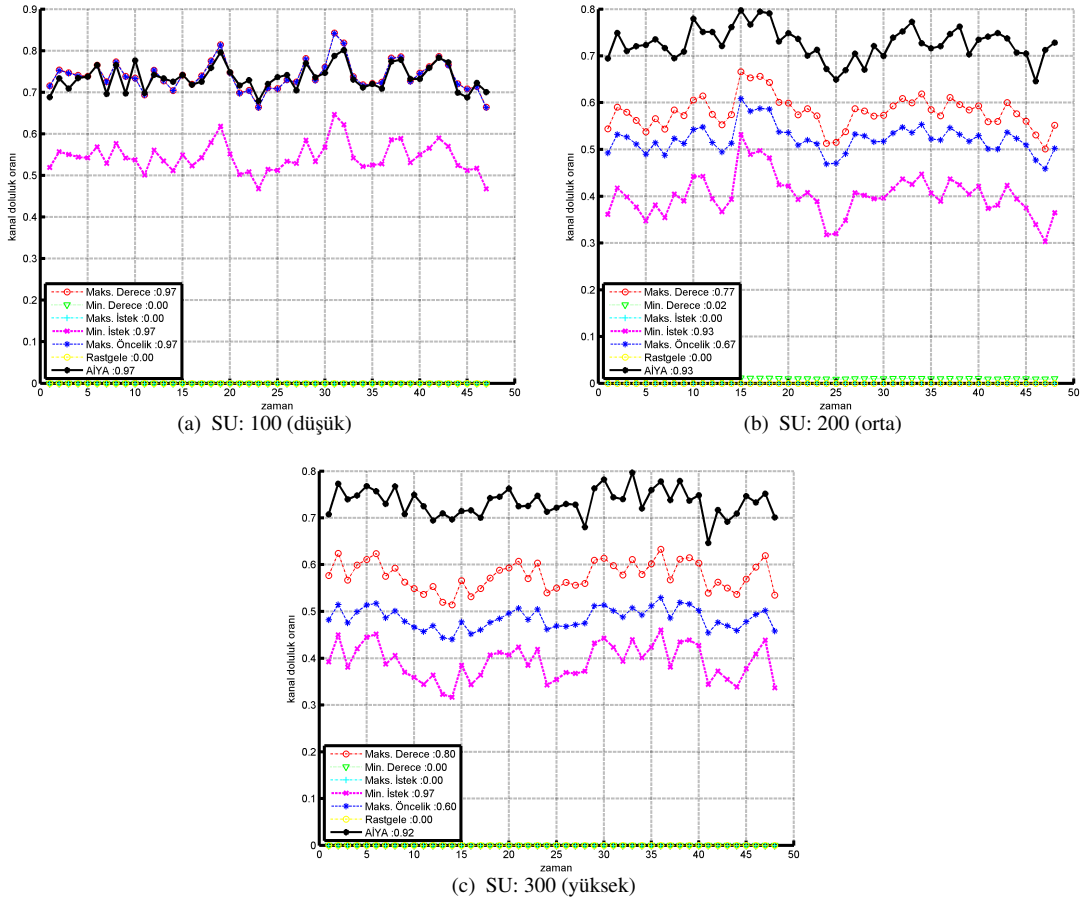
(c) λ: 10 (seyrek)

Şekil 7.1: Farklı λ değerleri için KDO sonuçları. ($KS = 60$ ve $İK = 300$)

Şekil 7.1'den de görüldüğü üzere, KDO ve KABO değerlerindeki düşüşler DSS'lerin bireysel koşturulmasında, AİYA'dan daha fazladır. Trafik yoğunluğu düştükçe DSS'lerin bireysel performansları da düşmektedir. Ancak, AİYA trafik yoğunluğunun değişiminden etkilenmemektedir.

7.3.2 Toplam İK sayısının etkisi

Bu bölümde, toplam İK sayısının performansa etkisini analiz etmek istedik. Bu nedenle öncelikle trafik yoğunluğunu (λ) ve toplam kanal sayısını sırasıyla 5 ve 60 olarak sabitledik. Şekil 7.2'de farklı *İK* değerleri için sonuçlar elde ettik. Düşük, orta ve yüksek sayıda İK sayısını belirlemek için sırasıyla 100, 200 ve 300 değerlerini kullandık.



(a) SU: 100 (düşük) (b) SU: 200 (orta)

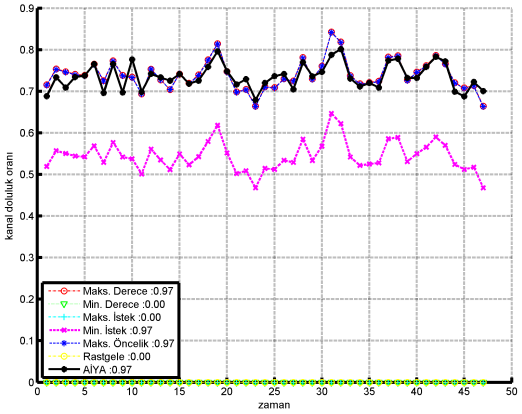
(c) SU: 300 (yüksek)

Şekil 7.2: Farklı *İK* değerleri için KDO sonuçları. ($\lambda = 5$ ve $KS = 60$)

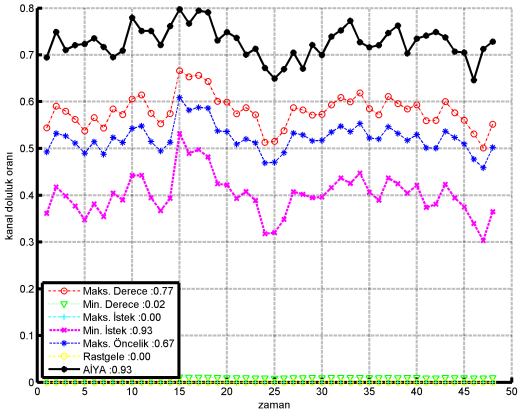
7.2'de görülebildiği üzere, DSS'lerin bireysel çözümlerinde KDO ve KABO değerlerinde yüksek bir düşüş meydana gelmiştir. Toplam İK sayısı arttıkça sınırlı sayıdaki kanalın atamasını yapmak zor olduğundan, bu, beklenen bir sonuçtu. AİYA için KABO değerinde hafif bir düşüş görülmektedir. Ancak, AİYA'nın KDO değeri sistemdeki toplam İK sayısından etkilenmemiştir. Bu sonuçlar, AİYA'nın KDO ve KABO bakımından çok iyi performans sergilediğini göstermektedir.

7.3.3 Toplam kanal sayısının etkisi

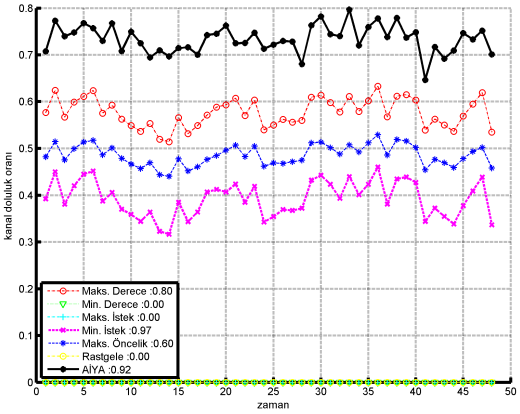
Bu bölümde, toplam kanal sayısının performansa etkisini analiz etmek istedik. BU nedenle trafik yoğunluğunu (λ) ve toplam İK sayısını sırasıyla 5 ve 300 olarak sabitledik. Şekil 7.3'te farklı kanal sayıları için 60, 80 ve 100 değerlerini kullandık.



(a) KS: 60 (düşük)



(b) KS: 80 (orta)



(c) KS: 100 (yüksek)

Şekil 7.3: Farklı kanal sayıları için KDO sonuçları. ($\lambda = 5$ ve $İK = 300$)

7.3'te görüldüğü üzere, AİYA hariç diğer tüm yaklaşımlar kanal sayısının değişiminden etkilenmiştir. KDO ve KABO bakımından AİYA en iyi sonuçları vermiştir.

7.4 Genel Değerlendirme

Şekil 7.1-7.2-7.3'te görüldüğü üzere tüm DSS'ler arasında *Maksimim Derece* ve *Maksimum Öncelik* sezgiselleri, KDO bakımından en iyi performansı sağlayan sezgisellerdir. Benzer şekilde, *Minimum İstek* sezgiseli de en iyi sonuçları vermiştir. Ancak, bu DSS'ye ait KDO sonuçları çok düşüktür. Bunun sebebi, sezgiselin kanal

ataması yaparken öncelik olarak tüm İK'lar arasından en düşük isteğe sahip olanları seçmesidir. Doğal olarak da KDO sonuçları düşük çıkmaktadır. Küçük istekler için bu DSS ile kanal ataması yapabilmek oldukça kolaydır, ayrıca KABO değeri de oldukça yüksektir. *Minimum Derece*, *Maksimum İstek*, ve *Rastgele* DSS'leri ise en kötü sonuçları veren DSS'lerdir. Bu sezgisellerin KABO değerleri sıfıra eşittir. Bu bölümde verilen sonuç grafiklerinde, AİYA'nın verdiği sonuçlar ya en iyisidir ya da iyi sonuçlar veren DSS'ler ile aynıdır.

Tüm 72 test örneğini ele aldığımızda yukarıda bahsedilen gözlemler genel olarak hepsi için geçerlidir. Ancak, çok az test örneğinde *Maksimum İstek* DSS'nin KABO değerinin sıfırdan büyük olduğunu gözlemlenmiştir. Buna rağmen, performansı diğer iyi DSS'ler kadar iyi değildir. Yine tüm test örneklerinin verdiği sonuçlara baktığımızda AİYA'nın bir kaç durumda DSS'lerden kötü sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir ancak bu da beklenen bir durumdu. Çünkü, ÜS'ler bir test örneği hakkında özel bilgiler talep etmeden, problemden bağımsız olarak tasarlanırlar. Bu şekilde baktığımızda, sonuçlar AİYA'nın hem KABO hem de KDO bakımından oldukça başarılı bir algoritma olduğunu göstermektedir.

8. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMA

Bu tezde, Bilişsel Radyo Ağlarında, Kanal Ataması Problemi'ni çözmek için çalıştık. Altı tane düşük seviyeli sezgisel kullanan bir Adaptif İteratif Yapıcı Arama temelli üst sezgisel tasarladık. Testleri, farklı parametreler altında önerilen yaklaşımın performansını görmek için uyguladık. Bu testleri yapabilmek için öncelikle değişik parametrelere sahip 72 farklı test örneği oluşturduk ve daha sonra tüm bu test örneklerini hem önerilen algoritma ile hem de her bir düşük seviyeli sezgisel ile ayrı ayrı çözdük. Sonuçlar iki farklı kriteri temel alarak hesaplandı: i) Kanal ataması başarım oranı (KABO), ii) Kanal dolululuk oranı (KDO).

Sonuçlara bakılınca, bazı tip test örnekleri için bir düşük seviyeli sezgisel diğerlerinden daha iyi sonuç verebildiği gibi, başka tip test örnekleri için de bir diğeri ötekilerden daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Genel olarak, her bir düşük seviyeli sezgiselin atama yaparken dikkate aldığı bir kural olduğu için (düşük seviyeli sezgisellerden birinin atama yaparken seçeceği ikincil kullanıcıyı, ikincil kullanıcıların istek seviyelerine göre seçmesi) her biri ilgili test örneklerinde iyi sonuçlar verebilmektedir. Ancak, üst sezgisel yaklaşımı, tüm düşük seviyeli sezgisellerin avantajlarını bir arada toplar ve her bir test örneği için hepsinin özelliklerinden faydalanır. Adaptif İteratif Yapıcı Arama'nın öğrenme mekanizmasını oluşturan feromon matrisi, üst sezgisele zaman geçtikçe hangi düşük seviyeli sezgiselin hangi durumlarda daha iyi olduğunu öğretir. Bununla beraber, üst sezgisel mekanizması hiç bir test örneğinin özelliklerini bilmeden iyi ve kabul edilebilir sonuçları kabul eder, ancak, bunlar tüm test örnekleri için en iyi sonuçlar olmayabilir.

Gelecek çalışmada, amaç fonksiyonu olarak sadece kanal doluluk oranı optimize edilmeyecek, ayrıca ikincil kullanıcılar arasında adillik (fairness) (herhangi bir ikincil kullanıcının sürekli beklememesi) ve yine ikincil kullanıcıların yaptığı kanal değiştirme sayısının minimumda tutulması optimize edilecek.

KAYNAKLAR

[1] **Haykin, S.** (2005). Cognitive radio: brain-empowered wireless communications, *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, ***23***(2), 201–220.

[2] **Mitola, J. ve Maguire Jr, G.Q.** (1999). Cognitive radio: making software radios more personal, *Personal Communications, IEEE*, ***6***(4), 13–18.

[3] **Mitola, J.** (2000). Cognitive Radio—An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio.

[4] **Ahmed, E.**, **Gani, A.**, **Abolfazli, S.**, **Yao, L. ve Khan, S.** (2014). Channel assignment algorithms in cognitive radio networks: Taxonomy, open issues, and challenges.

[5] **San José-Revuelta, L.M.** (2007). A new adaptive genetic algorithm for fixed channel assignment, *Information Sciences*, ***177***(13), 2655–2678.

[6] **San José-Revuelta, L.M.** (2008). An heuristic search technique for fixed frequency assignment in non-homogeneous demand systems, *Signal Processing*, ***88***(6), 1461–1476.

[7] **Luo, X. ve Kar, K.** (2011). Dynamic channel assignment and power allocation in multichannel wireless networks with per-user bandwidth guarantees, *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt), 2011 International Symposium on*, IEEE, s.377–382.

[8] **Kim, S.J. ve Cho, I.** (2013). Graph-based dynamic channel assignment scheme for femtocell networks, *Communications Letters, IEEE*, ***17***(9), 1718–1721.

[9] **Riyaz, B. ve Saranya, S.** (2012). Improving energy efficiency of wireless mesh network using hybrid channel assignment protocol, *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on*, IEEE, s.354–358.

[10] **Sarasvathi, V. ve Iyengar, N.C.S.** (2012). Centralized rank based channel assignment for multi-radio multi-channel wireless mesh networks, *Procedia Technology*, ***4***, 182–186.

[11] **Drieberg, M. ve Zheng, F.C.** (2012). Centralized channel assignment for IEEE 802.11 WLANs: Utilization MinMax-Sum, *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2012 15th International Symposium on*, IEEE, s.633–637.

[12] **Juraschek, F.**, **Seif, S. ve Gunes, M.** (2013). Distributed channel assignment in large-scale wireless mesh networks: A performance analysis,

Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on, IEEE, s.1661–1665.

[13] **Hong, W.W.**, **Long, F.**, **Xia, P. ve Chan, S.H.G.** (2012). Distributed joint channel and routing assignment for multimedia wireless mesh networks, *Multimedia and Expo (ICME), 2012 IEEE International Conference on*, IEEE, s.404–409.

[14] **Saffre, F.**, **Tateson, R. ve Ghanea-Hercock, R.** (2004). Reliable sensor networks using decentralised channel selection, *Computer Networks*, ***46***(5), 651–663.

[15] **Rad, A.H.M. ve Wong, V.W.** (2006). WSN16-4: logical topology design and interface assignment for multi-channel wireless mesh networks, *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM'06. IEEE*, IEEE, s.1–6.

[16] **Conti, M.**, **Das, S.**, **Lenzini, L. ve Skalli, H.**, (2008). Channel assignment strategies for wireless mesh networks, Wireless Mesh Networks, Springer, s.113–142.

[17] **Xing, K.**, **Cheng, X.**, **Ma, L. ve Liang, Q.** (2007). Superimposed code based channel assignment in multi-radio multi-channel wireless mesh networks, *Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking*, ACM, s.15–26.

[18] **Akyildiz, I.F.**, **Lee, W.Y.**, **Vuran, M.C. ve Mohanty, S.** (2006). NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey, *Computer Networks*, ***50***(13), 2127–2159.

[19] **Ding, Y. ve Xiao, L.** (2010). Routing and spectrum allocation for video on-demand streaming in cognitive wireless mesh networks, *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2010 IEEE 7th International Conference on*, IEEE, s.242–251.

[20] **Zuo, C.**, **Xiong, C.**, **Zhang, H. ve Fang, C.** (2013). Graph coloring based channel assignment framework for rural wireless mesh networks, *Journal of Electronics (China)*, ***30***(5), 436–446.

[21] **Kolodziej, J.**, **Khan, S.U.**, **Wang, L. ve Chen, D.** (2013). Game-Based Models of Grid User's Decisions in Security-Aware Scheduling, *Large Scale Network-Centric Distributed Systems*, 431–462.

[22] **Shamshirband, S.**, **Patel, A.**, **Anuar, N.B.**, **Kiah, M.L.M. ve Abraham, A.** (2014). Cooperative game theoretic approach using fuzzy Q-learning for detecting and preventing intrusions in wireless sensor networks, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, ***32***, 228–241.

[23] **Hoang, A.T. ve Liang, Y.C.** (2008). Downlink channel assignment and power control for cognitive radio networks, *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, ***7***(8), 3106–3117.

[24] **Wang, W.**, **Kasiri, B.**, **Cai, J. ve Alfa, A.S.** (2011). Channel assignment of cooperative spectrum sensing in multi-channel cognitive radio networks, *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, IEEE, s.1–5.

[25] **Lee, D.H. ve Jeon, W.S.** (2011). Channel assignment and routing with overhead reduction for cognitive radio-based wireless mesh networks, *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2011 International Conference on*, IEEE, s.1–5.

[26] **Su, W.**, **Matyjas, J.D. ve Batalama, S.** (2012). Active cooperation between primary users and cognitive radio users in heterogeneous ad-hoc networks, *Signal Processing, IEEE Transactions on*, ***60***(4), 1796–1805.

[27] **Hoos, H.H. ve Stützle, T.** (2005). *Stochastic local search: Foundations & applications*, Elsevier.

[28] **Gendreau, M. ve Potvin, J.Y.** (2010). *Handbook of metaheuristics*, cilt 2, Springer.

[29] **Resende, M.**, **Ribeiro, C.**, **Glover, F. ve Kochenberger, G.** (2003). Handbook of Metaheuristics, *Editado por Glover, F. e Kochenberger, G., Capítulo Greedy Randomized Adaptive Search Procedures, Ed. Kluwer Academic Publishers, pg*, 219–249.

[30] **Eiben, A.E. ve Smith, J.E.** (2003). *Introduction to evolutionary computing*, Springer Science & Business Media.

[31] **Bonabeau, E.**, **Dorigo, M. ve Theraulaz, G.** (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*, 1, Oxford university press.

[32] **Dorigo, M.S.**, (2004), T.(2004). Ant Colony Optimization.

[33] **Maurice, C.** (2006). Particle swarm optimization, *ISTE Ldt, USA*.

[34] **DasGupta, D.** (2014). *Artificial immune systems and their applications*, Springer Publishing Company, Incorporated.

[35] **Hoos, H.H. ve Stützle, T.** (2004). *Stochastic local search: Foundations & applications*, Elsevier.

[36] **Fisher, H. ve Thompson, G.L.** (1963). Probabilistic learning combinations of local job-shop scheduling rules, *Industrial scheduling*, ***3***, 225–251.

[37] **Burke, E.K.**, **Hyde, M.**, **Kendall, G.**, **Ochoa, G.**, **Özcan, E. ve Woodward, J.R.**, (2010). A classification of hyper-heuristic approaches, Handbook of metaheuristics, Springer, s.449–468.

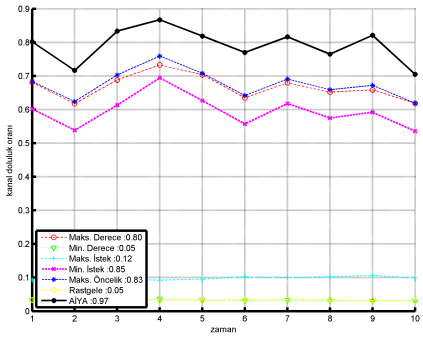
[38] **Cotta, C.**, **Sevaux, M. ve Sörensen, K.** (2008). *Adaptive and multilevel metaheuristics*, cilt136, Springer Science & Business Media.

[39] **Ergin, F.C.**, **Uyar, A.Ş. ve Yayimli, A.**, (2011). Investigation of hyper-heuristics for designing survivable virtual topologies in optical WDM Networks, Applications of Evolutionary Computation, Springer, s.1–10.

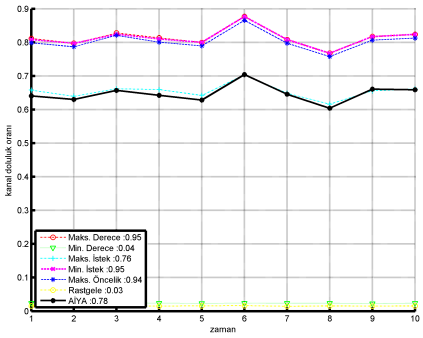
EKLER

EK A.1 : Test Sonuçları

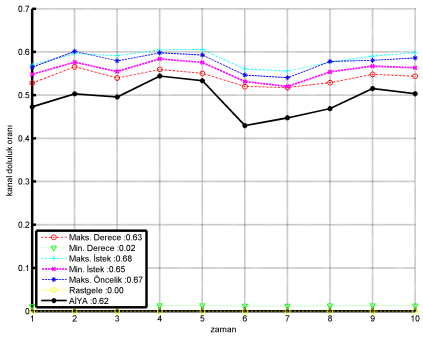
EK A.1



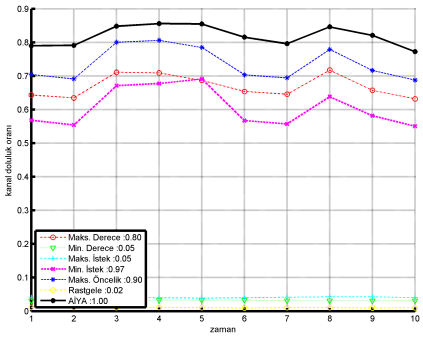
(a) λ=1 PS=10 İK=80 KS=60



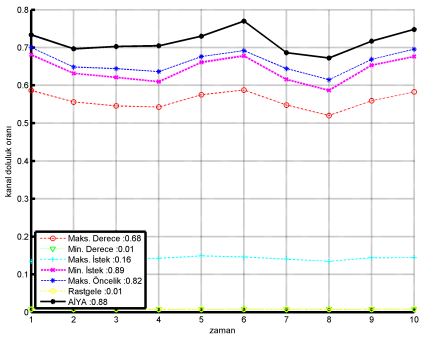
(b) λ=1 PS=10 İK=80 KS=80



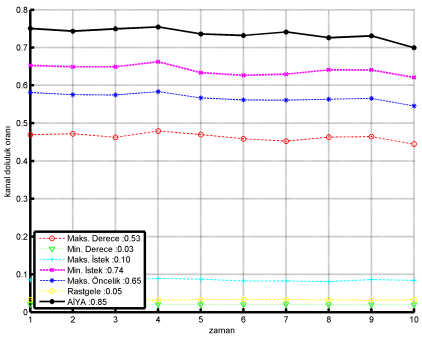
(c) λ=1 PS=10 İK=80 KS=100



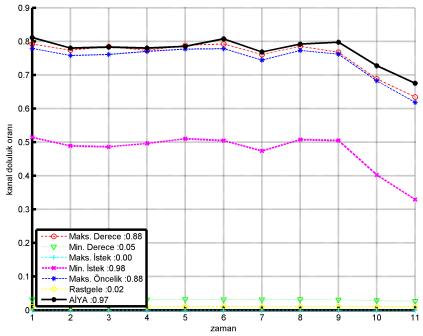
(d) λ=1 PS=10 İK=100 KS=60



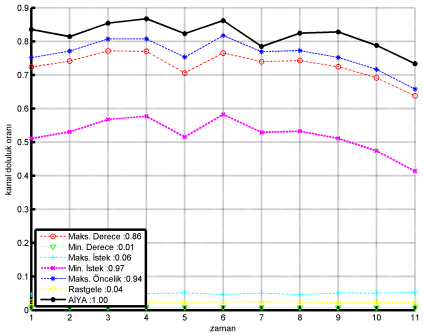
(e) λ=1 PS=10 İK=100 KS=80



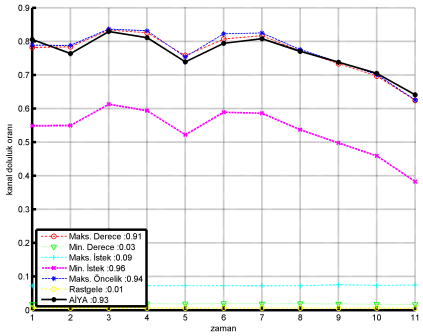
(f) λ=1 PS=10 İK=100 KS=100



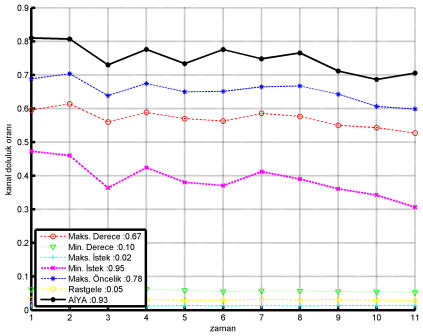
(g) λ=1 PS=10 İK=200 KS=60



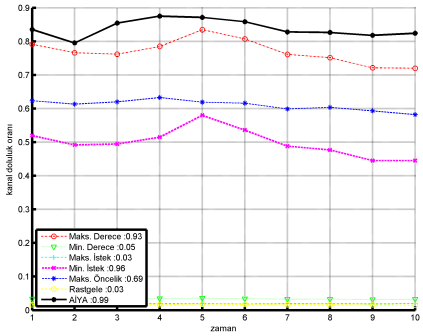
(h) λ=1 PS=10 İK=200 KS=80



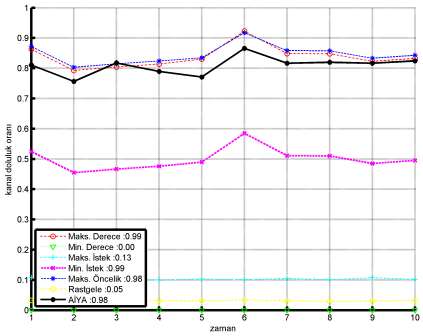
(i) λ=1 PS=10 İK=200 KS=100



(j) λ=1 PS=10 İK=300 KS=60

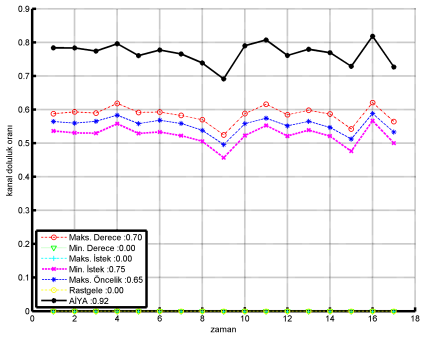


(k) λ=1 PS=10 İK=300 KS=80

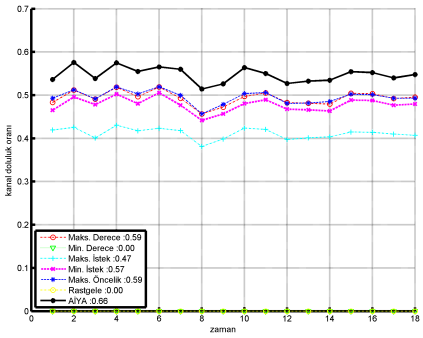


(l) λ=1 PS=10 İK=300 KS=100

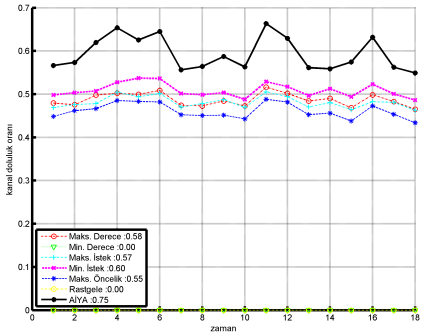
Şekil A.1: Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 1$ ve $PS = 10$)



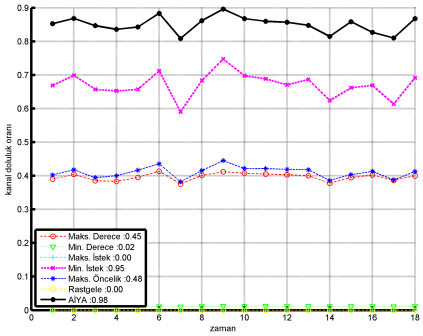
(a) λ=1 PS=20 İK=80 KS=60



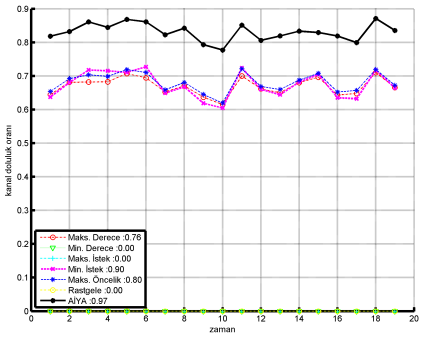
(b) λ=1 PS=20 İK=80 KS=80



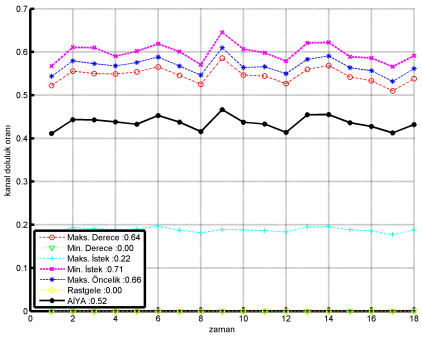
(c) λ=1 PS=20 İK=80 KS=100



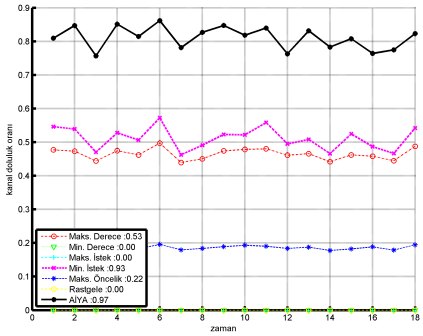
(d) λ=1 PS=20 İK=100 KS=60



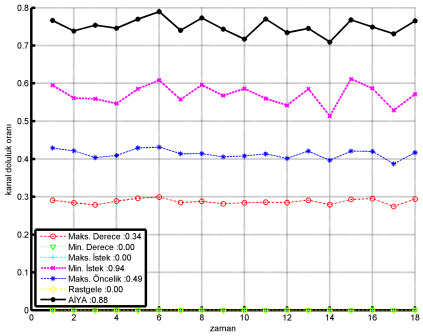
(e) λ=1 PS=20 İK=100 KS=80



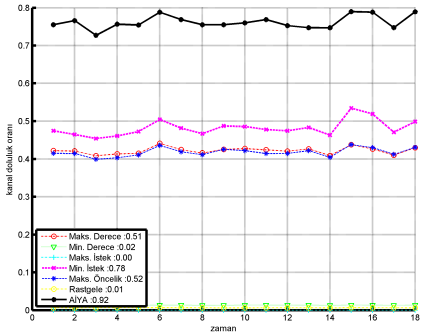
(f) λ=1 PS=20 İK=100 KS=100



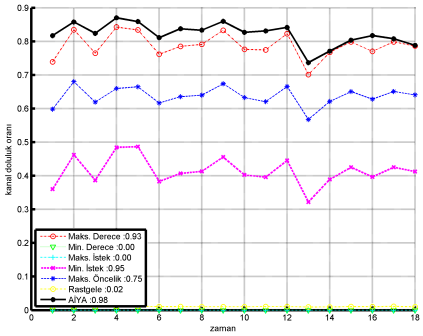
(g) λ=1 PS=20 İK=200 KS=60



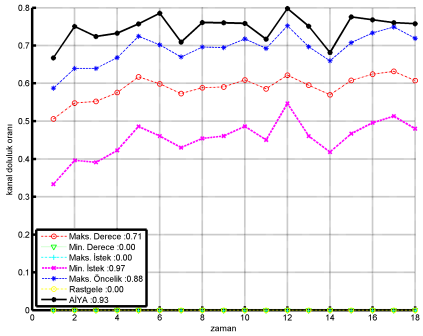
(h) λ=1 PS=20 İK=200 KS=80



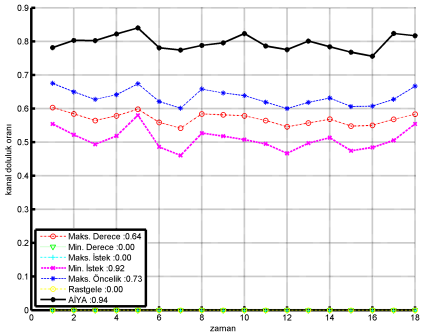
(i) λ=1 PS=20 İK=200 KS=100



(j) λ=1 PS=20 İK=300 KS=60

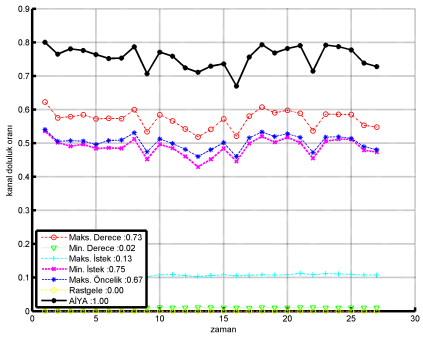


(k) λ=1 PS=20 İK=300 KS=80

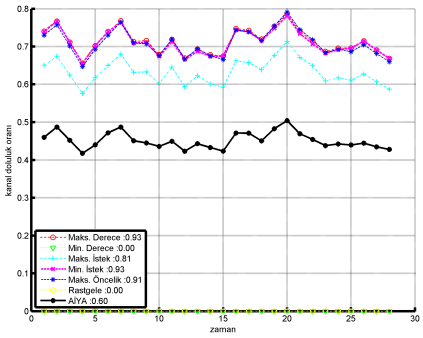


(l) λ=1 PS=20 İK=300 KS=100

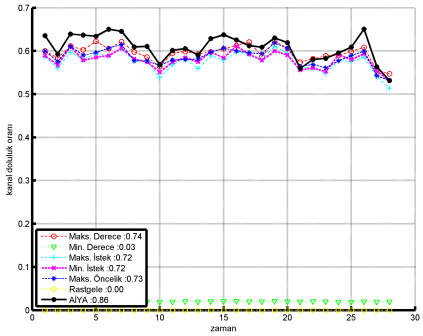
Şekil A.2: Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 1$ ve $PS = 20$)



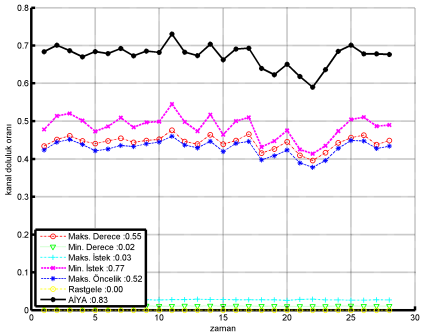
(a) λ=5 PS=10 İK=80 KS=60



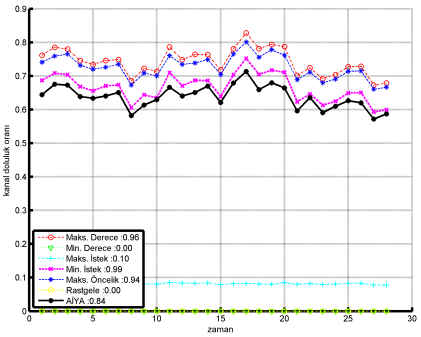
(b) λ=5 PS=10 İK=80 KS=80



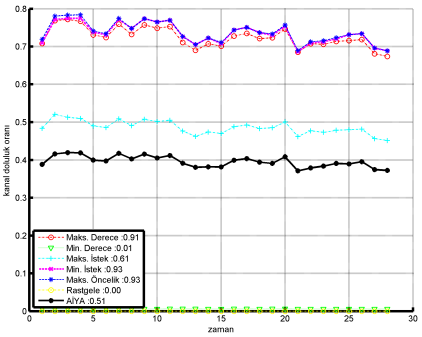
(c) λ=5 PS=10 İK=80 KS=100



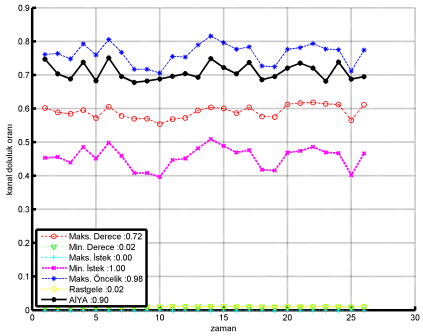
(d) λ=5 PS=10 İK=100 KS=60



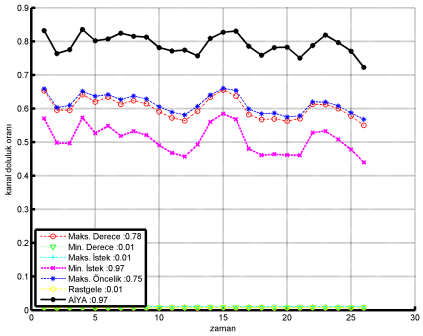
(e) λ=5 PS=10 İK=100 KS=80



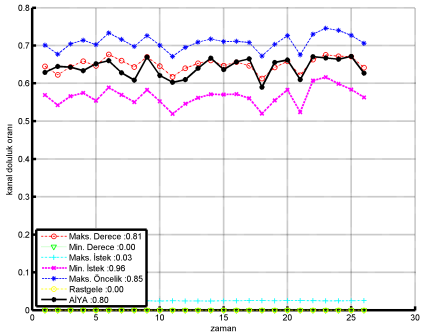
(f) λ=5 PS=10 İK=100 KS=100



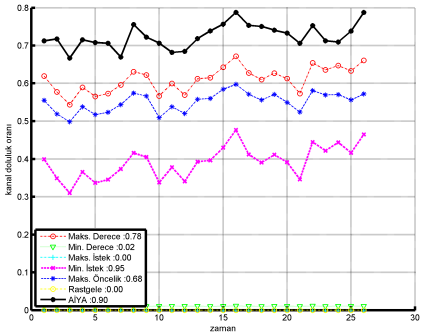
(g) λ=5 PS=10 İK=200 KS=60



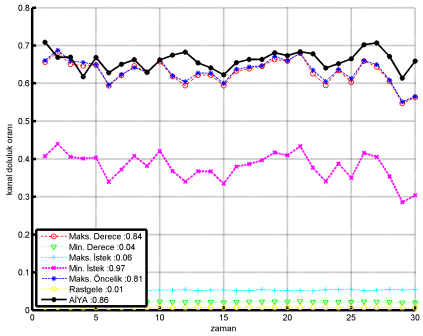
(h) λ=5 PS=10 İK=200 KS=80



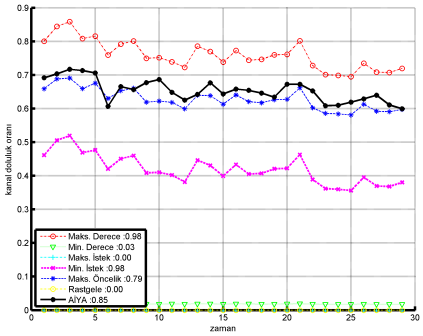
(i) λ=5 PS=10 İK=200 KS=100



(j) λ=5 PS=10 İK=300 KS=60

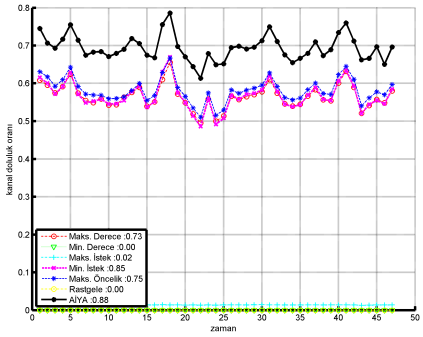


(k) λ=5 PS=10 İK=300 KS=80

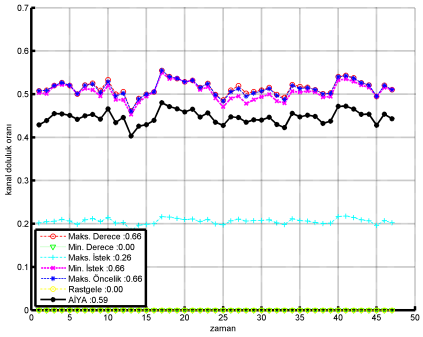


(l) λ=5 PS=10 İK=300 KS=100

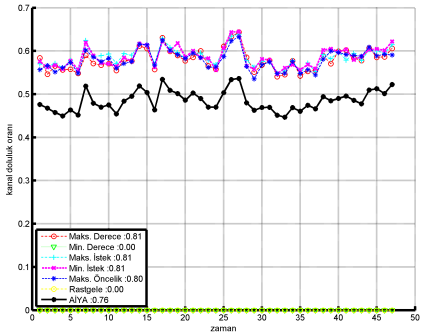
Şekil A.3: Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 5$ ve $PS = 10$)



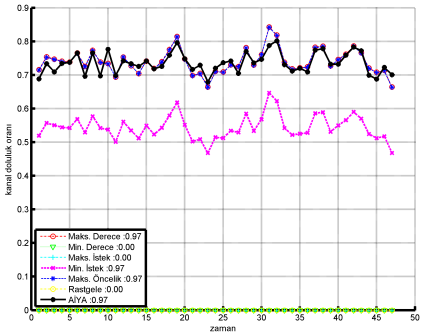
(a) λ=5 PS=20 İK=80 KS=60



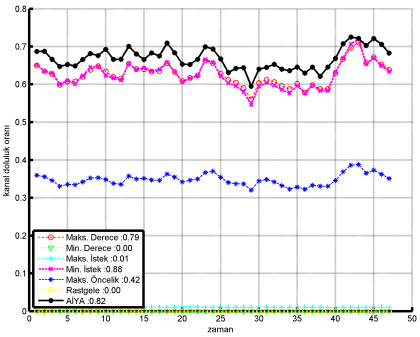
(b) λ=5 PS=20 İK=80 KS=80



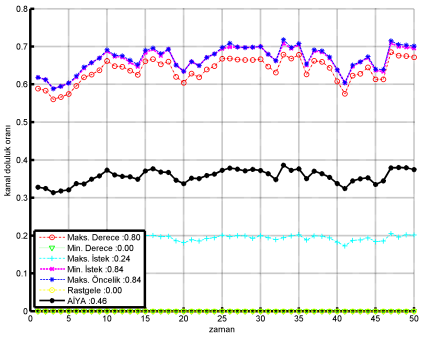
(c) λ=5 PS=20 İK=80 KS=100



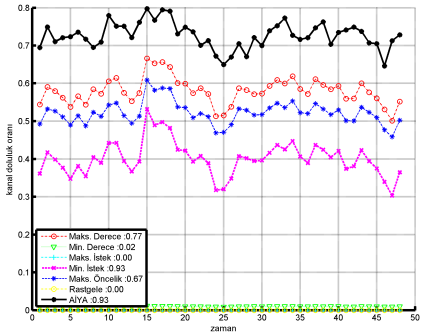
(d) λ=5 PS=20 İK=100 KS=60



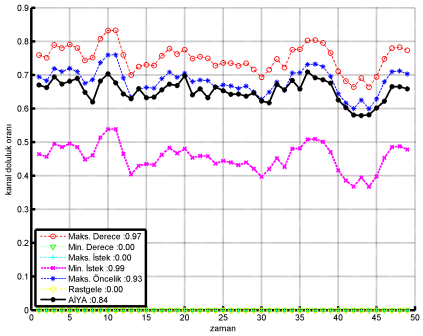
(e) λ=5 PS=20 İK=100 KS=80



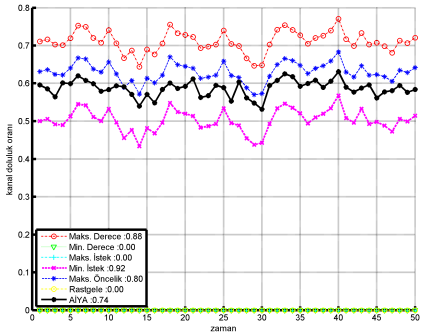
(f) λ=5 PS=20 İK=100 KS=100



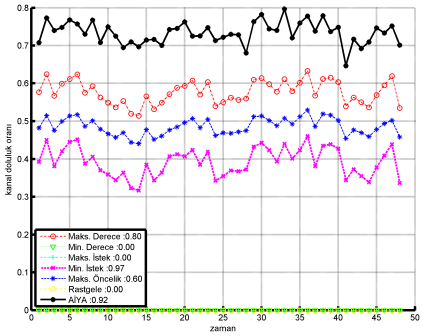
(g) λ=5 PS=20 İK=200 KS=60



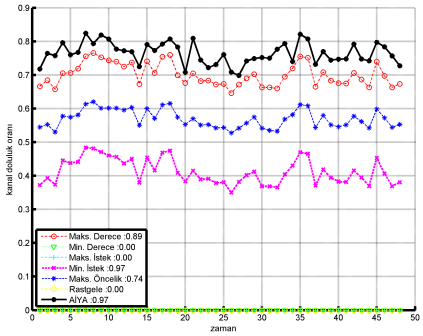
(h) λ=5 PS=20 İK=200 KS=80



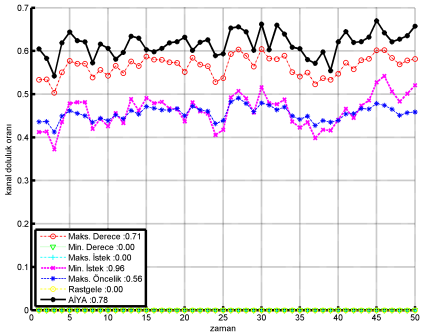
(i) λ=5 PS=20 İK=200 KS=100



(j) λ=5 PS=20 İK=300 KS=60

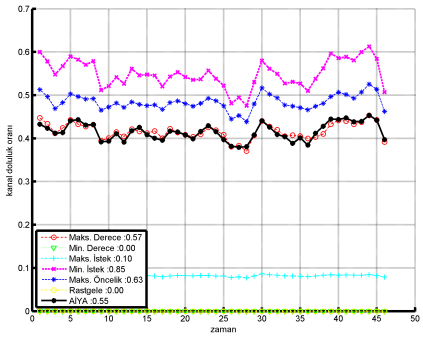


(k) λ=5 PS=20 İK=300 KS=80

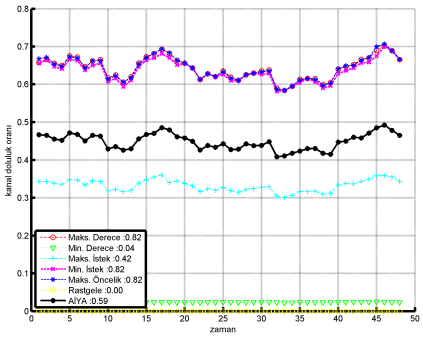


(l) λ=5 PS=20 İK=300 KS=100

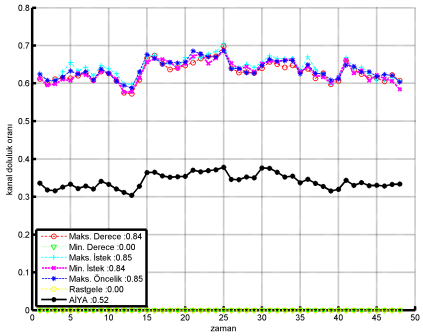
Şekil A.4: Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 5$ ve $PS = 20$)



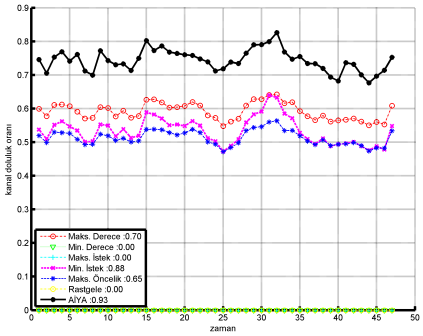
(a) λ=10 PS=10 İK=80 KS=60



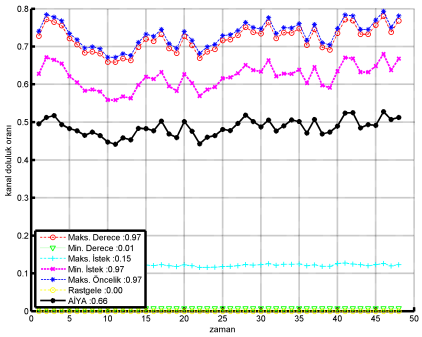
(b) λ=10 PS=10 İK=80 KS=80



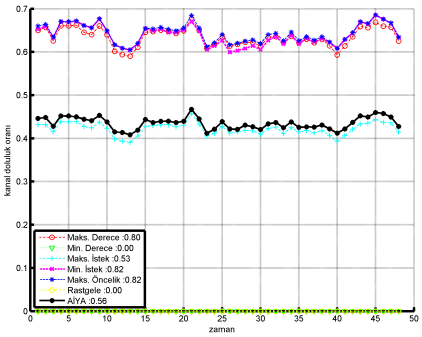
(c) λ=10 PS=10 İK=80 KS=100



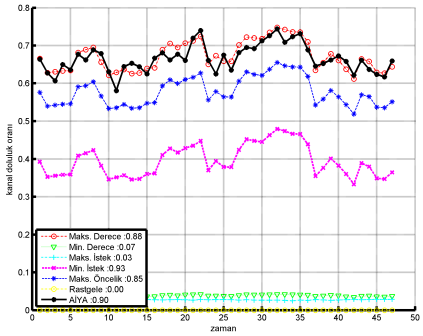
(d) λ=10 PS=10 İK=100 KS=60



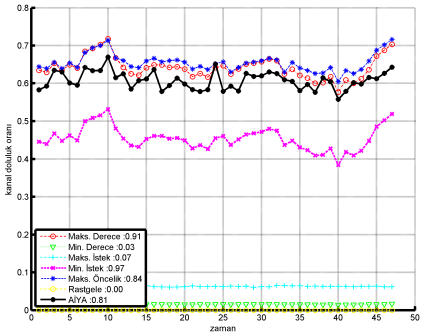
(e) λ=10 PS=10 İK=100 KS=80



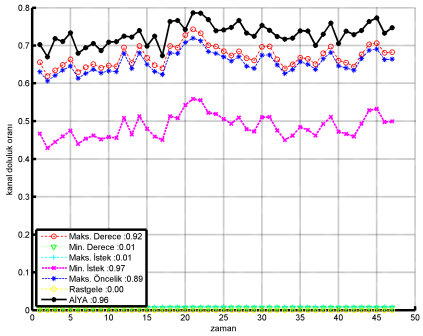
(f) λ=10 PS=10 İK=100 KS=100



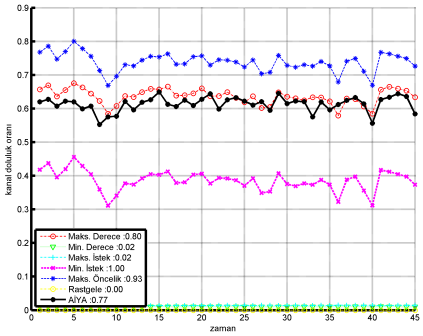
(g) λ=10 PS=10 İK=200 KS=60



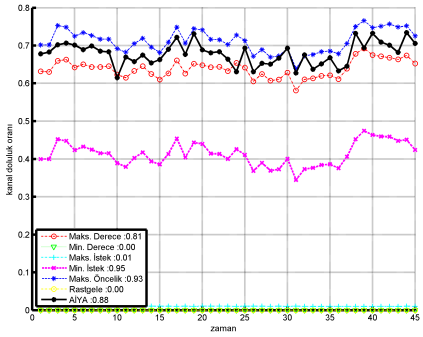
(h) λ=10 PS=10 İK=200 KS=80



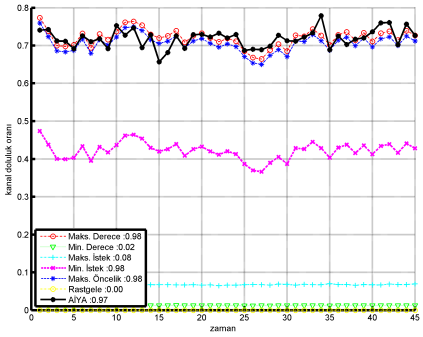
(i) λ=10 PS=10 İK=200 KS=100



(j) λ=10 PS=10 İK=300 KS=60

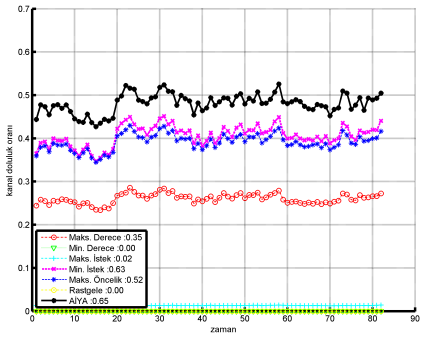


(k) λ=10 PS=10 İK=300 KS=80

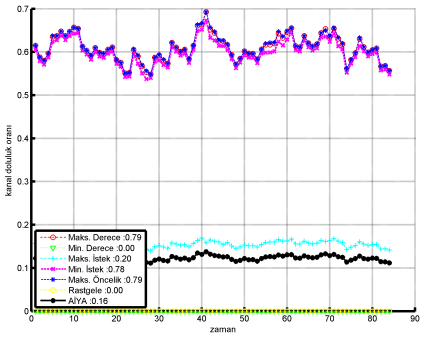


(l) λ=10 PS=10 İK=300 KS=100

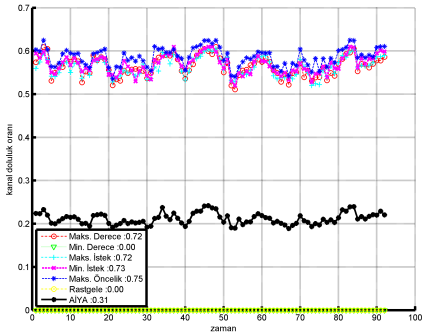
Şekil A.5: Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 10$ ve $PS = 10$)



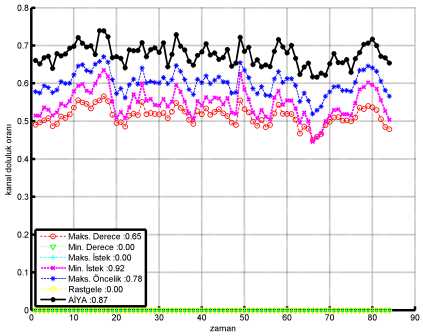
(a) λ=10 PS=20 İK=80 KS=60



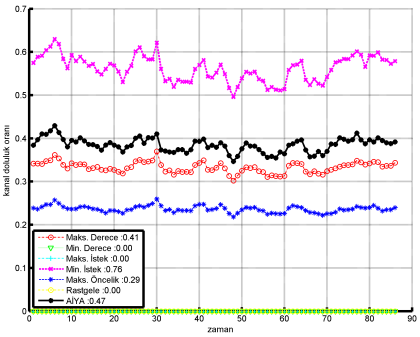
(b) λ=10 PS=20 İK=80 KS=80



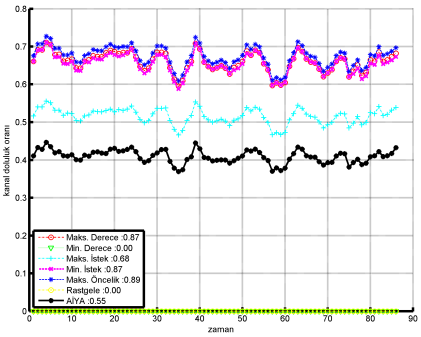
(c) λ=10 PS=20 İK=80 KS=100



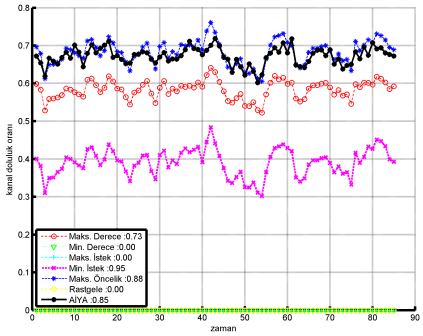
(d) λ=10 PS=20 İK=100 KS=60



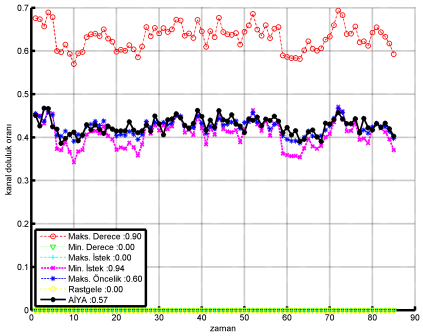
(e) λ=10 PS=20 İK=100 KS=80



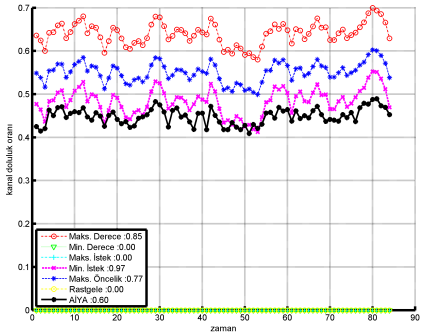
(f) λ=10 PS=20 İK=100 KS=100



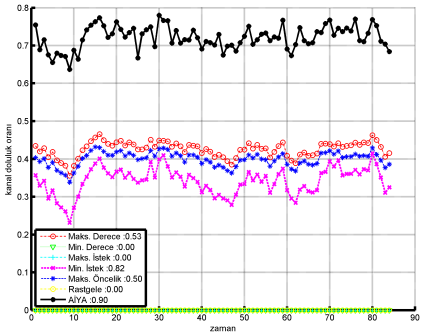
(g) λ=10 PS=20 İK=200 KS=60



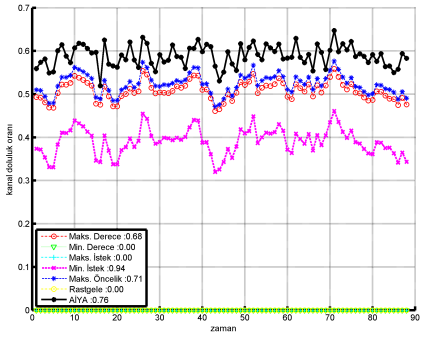
(h) λ=10 PS=20 İK=200 KS=80



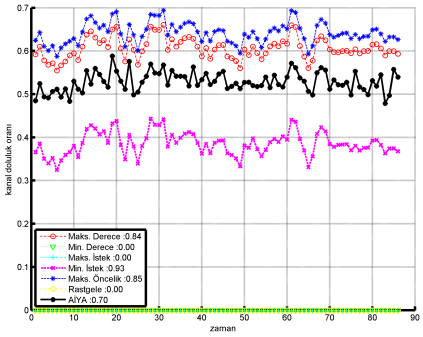
(i) λ=10 PS=20 İK=200 KS=100



(j) λ=10 PS=20 İK=300 KS=60



(k) λ=10 PS=20 İK=300 KS=80



(l) λ=10 PS=20 İK=300 KS=100

Şekil A.6: Farklı kanal ve İK sayıları için test sonuçları ($\lambda = 10$ ve $PS = 20$)

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Emrullah GAZİOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi: Batman - 07.09.1982

Adres: Kağıthane / İSTANBUL

E-Posta: emrullahgazioglu@gmail.com

Lisans: Marmara Üniversitesi