

## KABLOSUZ BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME İÇİN ÖNCELİK KUYRUKLARI VE YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİ

**Muhammed Enes BAYRAKDAR (ORCID ID: 0000-0001-9446-0988)\***  
**Ali ÇALHAN (ORCID ID: 0000-0002-5798-3103)**

*Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye*

*Geliş / Received: 26.05.2016*

*Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 17.02.2017*

*Kabul / Accepted: 27.02.2017*

### ÖZ

Bilişsel radyo, frekans bantlarındaki kullanılmayan ya da az kullanılan kısımların verimli bir biçimde kullanılmasını sağlayan yeni bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Kablosuz bilişsel radyo ağları, ikincil kullanıcılarının çeşitli sezme teknikleriyle frekans bantlarını dinleyerek spektrumun boş ya da az kullanılan kısımlarından fırsatçı bir şekilde yararlanmasını hedeflemektedir. Bu amaçla, ikincil kullanıcıların çeşitli sebeplerden dolayı kullandığı frekans kanalından diğer bir boş kanala geçiş işlemi spektrum el değiştirme olarak tanımlanmaktadır. Spektrum el değiştirme işleminin gerçekleştiği durumların başında, ikincil kullanıcılara tahsis edilen frekans kanallarının tekrar birincil kullanıcıların hizmetine sunulması durumu gelmektedir. Erişim noktaları tarafından karar verilen spektrum el değiştirme işlemi için çeşitli yöntem ve teknikler kullanılmaktadır. Öncelik kuyrukları, ikincil kullanıcıların kendi aralarındaki iletim sırasını belirlemek için oldukça önemlidir. Spektrum el değiştirme işleminin gerçekleşme kararının alınması için, yapay zekâ tekniklerinden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada, kablosuz bilişsel radyo ağları tabanlı spektrum el değiştirme işlemi için öncelik kuyrukları ve yapay zekâ teknikleri ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bilişsel radyo, spektrum el değiştirme, öncelik, yapay zekâ

## PRIORITY QUEUES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES FOR SPECTRUM HANDOFF IN WIRELESS COGNITIVE RADIO NETWORKS

### ABSTRACT

Cognitive radio has emerged as a new technology that provides usage of unused or under-utilized portions of frequency bands in an effective manner. Wireless cognitive radio networks aims to take advantage of vacant or under-utilized portions of the spectrum by allowing secondary users to sense the frequency bands with various sensing techniques in an opportunistic manner. Spectrum handoff is described as channel switching of secondary users while transmitting for a variety of reasons. Spectrum handoff process mostly occurs when a frequency channel allocated to secondary user is required to be utilized by primary users. Various methods and techniques are used for spectrum handoff process that is decided by access points. Priority queues are quite important for secondary users to determine the order of transmissions among themselves. For the decision of the realization of spectrum handoff process, artificial intelligence techniques are utilized. In this work, studies related to wireless cognitive radio based spectrum handoff process for priority queues and artificial intelligence techniques are investigated.

**Keywords:** Cognitive radio, spectrum handoff, priority, artificial intelligence

\*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 380 542 1133; e-mail / e-posta: muhammedbayrakdar@duzce.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Son zamanlarda, kablosuz teknolojileri kullanan cihaz sayısındaki artışla birlikte kablosuz ağ kullanımında da önemli artışlar meydana gelmiştir [1, 2]. Kablosuz kullanıcı sayısındaki artışla birlikte, kablosuz spektrumların yetersizliği problemi gün yüzüne çıkmıştır [3]. Yapılan araştırmalar sonucunda, kablosuz spektrum yetersizliğinin aslında mevcut spektrumların verimli bir şekilde kullanılmamasından kaynaklandığı anlaşılmıştır [4]. Verimli bir biçimde kullanılmadığı için boşta kalan kablosuz spektrumlar spektrum boşluğu veya beyaz boşluk olarak isimlendirilmektedir [5, 6]. Kablosuz spektrumda yer alan beyaz boşlukları daha etkili bir şekilde kullanmak için dinamik spektrum erişimi kavramı ortaya atılmıştır [7]. Günümüzde, dinamik spektrum erişimi sağlayan kablosuz ağ teknolojilerinin başında bilişsel radyo ağları gelmektedir [8, 9]. Bilişsel radyo ağları, bir spektrumdaki frekans bantlarının daha etkili bir biçimde kullanılması için geliştirilmiştir [10]. Bilişsel radyo ağlarında, spektrum bandındaki lisanslı (birincil) kullanıcılar kendi frekans bantlarını kullanmadığında boş olan frekans bantları lisanssız (ikincil) kullanıcılar tarafından kullanılmaktadır [11]. Frekans bantlarının daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için birçok ortam sezme yöntem ve teknikleri vardır [12]. Ortam sezme yöntem ve teknikleri sayesinde, kablosuz spektrumda lisanslı bir kullanıcı olup olmadığı tespit edilmekte ve eğer yok ise lisanssız kullanıcının boş spektrumdan yararlanması sağlanmaktadır [13].

Kablosuz bilişsel radyo ağlarında, birincil kullanıcıların ikincil kullanıcılar tarafından hiçbir girişime (interference) maruz kalmamaları oldukça önemlidir [14]. Birincil kullanıcıların hiçbir şekilde girişime maruz kalmamaları, bilişsel radyo ağları tarafından mutlaka sağlanması gereken bir koşuldur [15]. Bununla birlikte, frekans kanalında herhangi bir ikincil kullanıcı iletim yaptığı sırada, kanal birincil kullanıcı tarafından kullanılacaksa spektrumun boşaltılması gerekmektedir [16]. Bu durumda, ikincil kullanıcının frekans bandını boşaltmak amacıyla iletimini sonlandırması veya boş bir frekans bandına geçerek iletimini sürdürmesi gerekmektedir [17, 18]. İkincil kullanıcıların frekans bandını boşaltmak için bir kanaldan başka bir kanala geçerek iletimini sürdürmesi spektrum el değiştirme olarak isimlendirilmektedir [19, 20, 21]. Bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme işlemini gerçekleştirmek için çeşitli yöntem ve teknikler bulunmaktadır [22, 23]. Bu yöntem ve teknikler sayesinde, ikincil kullanıcıların iletimleri kesilmeden diğer frekans bantlarına aktarılmaları sağlanmaktadır [24, 25].

Bilişsel radyo ağlarında kullanılan spektrum el değiştirme işleminde, öncelik sınıfları da göz önüne alınması gereken bir durumdur [26, 27]. Öncelik sınıfları veya öncelik kuyrukları, kablosuz ağ kullanıcılarının iletim yapacakları sırayı tanımlamaktadır [28]. Diğer bir ifadeyle, önceliği en yüksek olan kablosuz kullanıcı iletimini en önce gerçekleştirme hakkına sahiptir [29]. Engelli (preemptive) veya engelsiz (non-preemptive) öncelik sırası kullanımı da, kablosuz ağlardaki öncelik sınıfları ile ilgili olarak bilinmesi gereken diğer bir durumdur [3]. Engelli öncelik kullanıldığı durumlarda, spektrum bandındaki düşük öncelikli iletim yarıda kesilerek yüksek öncelikli iletimin başlanması sağlanmaktadır. Engelsiz öncelik kullanıldığı durumlarda ise, spektrum bandındaki düşük öncelikli iletimin tamamlanması beklenir ve düşük öncelikli iletimin tamamlanmasının ardından yüksek öncelikli iletimin başlaması sağlanmaktadır [3].

Kablosuz bilişsel radyo ağlarındaki ikincil kullanıcılara, spektrumda bulunan boş spektrum bantlarından ihtiyaçları için en uygun olan kanalın tahsis edilmesi gerekmektedir [30]. Mevcut spektrum bantları arasından en uygun kanalın tespit edilmesinde bazı parametrelerin ve ikincil kullanıcıların iletim gereksinimlerinin göz önünde bulundurulması kaçınılmazdır [8]. Bu durumda, kablosuz frekans bandı özelliklerinin ve kullanıcı gereksinimlerinin çok parametreliliği karar verme süreçleri ile değerlendirmeye alınıp ikincil kullanıcılara ihtiyaçları için en uygun olan frekans bandı tahsisinin yapılması sağlanmalıdır. Yapay zekâ tabanlı teknikler, kablosuz bilişsel radyo ağlarındaki karar verme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [29]. Yapılan çalışmalara bakıldığında, spektrum el değiştirme işlemi için yapay zekâ tabanlı yaklaşımların kullanımının arttığı görülmektedir.

İnsanın düşünme yöntem ve metotlarını inceleyerek bunlara benzer bir şekilde yapay yönergeleri geliştirmeye çalışmak yapay zekâ olarak tanımlanmaktadır [31]. Yapay zekâ sistemlerinden; insanlara özgü olan öğrenme, algılama, düşünme, fikir yürütme, kavramlar arasında ilişki kurma, çıkarım yapma ve karar verme gibi işlevleri gerçekleştirmesi beklenmektedir [31]. Yaygın olarak kullanılan yapay zekâ tekniklerinin başında; bulanık mantık, yapay sinir ağları, uzman sistemler ve genetik algoritmalar gelmektedir [29].

## 2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARI

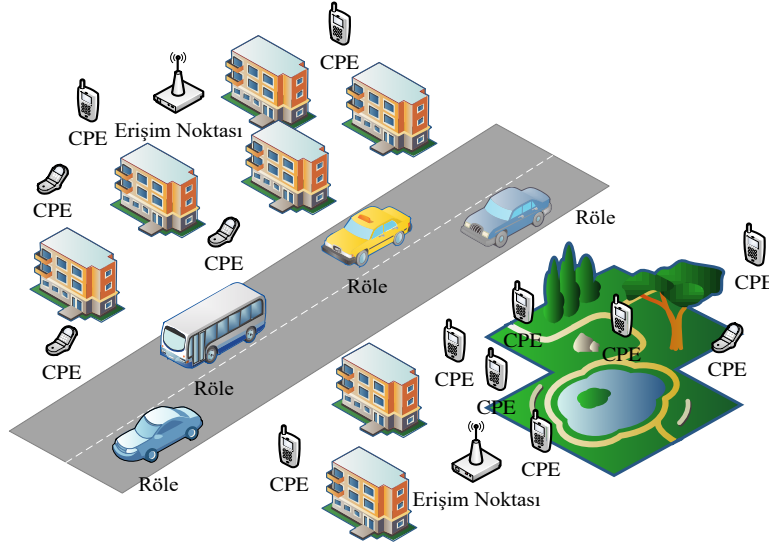
Bilişsel radyo teknolojisi, spektrumdaki boşluklara dinamik olarak erişim olanağı sağlayan teknolojilerden en güncel olanıdır [32]. Bilişsel radyo, çevresi ile sürekli olarak etkileşim halinde olan ve haberleşme parametrelerini dinamik olarak değiştirebilen teknolojik bir sistem olarak ifade edilmektedir [33]. Bu tanımlamadan da anlaşıldığı üzere, bilişsel özelliğe sahip olması ve parametrelerini sürekli olarak



televizyon kanallarında bulunan spektrum boşluklarındaki iletişim tekniğinin özelliklerini ortaya çıkarmaktadır [6].

## 2.2. TV Spektrumundaki Beyaz Boşlukların Paylaşımı için IEEE 802.11af Standardı

Günümüzde, spektrum bantları hem lisanslı hem de lisanssız olarak hizmet vermektedir. Sabit spektrum tahsisleri, kablosuz cihazlardaki artışı desteklemek için kullanılan kaynakları sınırlandırmaktadır [13]. IEEE 802.11af, lisanssız beyaz boşluk cihazları (WSD) ve TV beyaz boşluk bantlarını kullanan lisanslı servisler arasında spektrum paylaşımı için uluslararası standartları belirlemektedir [13, 19]. Spektrum paylaşımı, bir nesnenin coğrafi konumunu tutan veri tabanı (GDB) tarafından lisanssız WSD'ler aracılığıyla yapılır [13]. IEEE 802.11af standardı, WSD'ler için ortak bir işletim mimarisi ve mekanizması sağlamaktadır [19].



Şekil 2. IEEE 802.11af ağ ortamı

Şekil 2'de görülmekte olan kullanıcılar IEEE 802.11af yapısında müşteri öncül ekipman (CPE) olarak isimlendirilmektedirler. IEEE 802.11af protokolü, IEEE 802.11 protokolünün iyileştirilmiş biçimidir [13]. Bu protokolde, TV beyaz boşluklarını paylaşmak için bilişsel radyo tabanlı erişim noktası (AP) ve istasyon (STA) bulunmaktadır [19]. Tablo 1'de, IEEE 802.11af protokolünde yer alan tüm cihazların kısaltmaları ve açıklamaları verilmiştir.

Tablo 1. IEEE 802.11af protokolündeki cihazlar

Cihaz	Açıklama
WSD	White space devices (Beyaz boşluk cihazları)
GDB	Geolocation database (Coğrafi konum veritabanı)
CPE	Customer premises equipment (Müşteri öncül ekipman)
AP	Access point (Erişim noktası)
STA	Station (İstasyon)
CVS	Contact verification signal (Bağlantı doğrulama sinyali)
DSE	Dynamic station enablement (Dinamik istasyon yetkilendirmesi)
CPM	Channel power management (Kanal güç yönetimi)

IEEE 802.11af sistemi; sabit (fixed), yetki veren (enabling) ve bağımlı (dependent) olmak üzere üç farklı STA'dan oluşmaktadır. Sabit STA ve yetki veren STA kayıtlı konumlarını yayımlayan kayıtlı STA'lardır. Yetki veren STA'nın, kayıtlı olmayan bir STA'ya (örneğin; bağımlı STA) yetki verme izni vardır. Yetki veren STA, mevcut kanal bilgilerini TV beyaz boşluk veri tabanından alır ve bağlantı doğrulama sinyali (CVS) gönderir. CVS, hem bağımlı STA'ların yetki veren STA'nın kapsama alanı içinde olduğunu saptamak hem de mevcut kanal listesini doğrulamak için kullanılır [13]. Dinamik istasyon yetkilendirmesi (DSE), bağımlı STA'lara, yetki veren STA'nın kontrolü altında mevcut TV kanallarını kullanmasına izin verir [19]. Ek olarak; kanal güç

yönetimi (CPM), mevcut kanal listesini güncellemek için kullanılmasının yanında iletim gücü, bant genişliği ve kanal frekansını değiştirmek için de kullanılmaktadır [13].

### 3. SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME İŞLEMİ İÇİN ÖNCELİK KUYRUKLARI VE YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİ

Kablosuz spektrum kanallarında, herhangi bir sezme tekniği yardımı ile birincil kullanıcı iletişimi tespit edildiğinde; ikincil kullanıcı birincil kullanıcının iletişimine zarar vermemek için kanalı boşaltmalıdır [37, 38]. Bu durumda, bilişsel radyo erişim noktası bazı parametrelere bakarak başka bir kanala geçişin olmasını sağlamaktadır [39, 40]. İkincil kullanıcıların iletişimini bir kanaldan başka bir kanala aktarma işlemi spektrum el değiştirme olarak tanımlanmaktadır [41, 42]. İkincil kullanıcılar kullanacakları frekans bantları için misafir niteliğindedir [43, 44]. Bu sebeple, eğer ikincil kullanıcı tarafından kullanılan spektrum kanallarının belirli bir bölümü birincil kullanıcılar tarafından kullanılacaksa ikincil kullanıcıların iletişimlerini spektrumun başka kısımlarında sürdürmeleri gerekmektedir [45, 46]. Bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme işleminin gerektiği üç farklı durum vardır [30, 47, 48]. İlk durum, spektrumda birincil kullanıcıların varlığının tespit edilmesidir [49, 50]. İkinci durum, iletişimin devam ettiği sırada kullanıcı hareketliliğinden dolayı ikincil kullanıcıların iletişimlerinin kesilmesidir [51-53]. Üçüncü durum ise, kullanılmakta olan spektrum kanalının gerekli olan en düşük hizmet kalitesini karşılayamamasıdır [54-56].

#### 3.1. Bilişsel Radyo Ağlarında Öncelik Kuyrukları

Kuyruk teorisi ilk olarak telefon trafikleri için geliştirilmiştir. Temeli 1917 yılında Erlang tarafından yazılan bir makale çalışmasına dayanmaktadır [20]. Günümüzde, trafik sıklığı analizi ve farklı servislerin listelenmesi gibi durumlarla ilişkili olan olasılık problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Haberleşme sistemlerinde, yeni bir çağrı geldiğinde eğer tüm hatlar dolu ise çağrı düşer [20]. Bu duruma kayıplı sistem adı verilir. Bunun yerine, yeni gelen çağrı bir kuyruğa yerleştirilip belirli bir gecikmenin ardından hat müsait olduğunda hizmet alabiliyorsa bu tür sistemlere de kuyruklu sistem adı verilir [20].

Bir kuyruğun tipini belirlemek için Kendall tarafından tanımlanan kısaltma notasyonları kullanılmaktadır. A/S/m/N/K şeklinde tanımlanan notasyonda her bir terimin bir anlamı Tablo 2'de verilmektedir. Verilen tanımlara göre, K sınırlı olduğunda; N değeri en fazla K olabilmektedir [20, 51]. Kendall notasyonunda yer alan A ve S terimleri için en çok kullanılan dağılım türleri Tablo 3'te gösterilmektedir. N ve K değerleri sonsuz olduğunda, Kendall notasyonunda gösterilmezler. Örneğin; M/M/1/∞/∞ notasyonu kısaca M/M/1 olarak yazılabilmektedir [45].

**Tablo 2.** Kendall notasyonu

Terim	Anlam
A	Varişlar arası zaman dağılımı (Interarrival time distribution)
S	Servis zamanı dağılımı (Service time distribution)
m	Sunucu sayısı (Number of servers)
N	Kuyrukta bekleyebilecek maksimum müşteri sayısı (Maximum number of customers that can be accommodated in the queue)
K	Giriş kaynağının boyutu (Size of input source)

**Tablo 3.** Dağılım türleri

Terim	Açıklama
M	Üstel dağılım (Exponential distribution) Markov ile ilgili olduğu için M harfiyle ifade edilmektedir. Genellikle Markov işleminin özel bir çeşidi olan Poisson dağılımı kullanılmaktadır.
D	Sabit tanımlı dağılım (Deterministic distribution) Servis zamanlarının sabit olduğu zamanlarda kullanılmaktadır.
G	Genel dağılımı (General distribution)

M.E. BAYRAKDAR, A. ÇALHAN

Kuyruk analizinde kullanılan en basit ve en yararlı formül, Little teoremi olarak bilinen  $L=\lambda W$  formülüdür ve  $\bar{Q}=\lambda E[W]$  şeklinde yazılabilmektedir.  $\bar{Q}$ ,  $Q(t)$  kuyruk boyutu işleminin ortalama süresini;  $\lambda$ , ortalama varış süresini ve  $E[W]$ , müşterilerin ortalama bekleme sürelerini temsil etmektedir.  $H=\lambda G$  ise, Little teoreminin genelleştirilmesiyle elde edilen yeni bir formüldür [53].  $H$  ve  $G$  parametreleri, sırasıyla birbirleriyle ilişkili olan zaman ve ortalama müşteri sayılarını temsil etmektedir. Örneğin;  $G$ , müşteri başına düşen ortalama maliyeti temsil ederse ve  $\lambda$ , müşteri varış oranı ise,  $H$  birim zamandaki ortalama zaman maliyetini temsil eder [20].

M/M/1 kuyruk sistemi, en basit kuyruk sistemi olarak bilinmektedir.  $\lambda$  oranlı varış Poisson varışlar, ortalama  $1/\mu$  üstel dağılımlı servis süreleri ve tek sunuculu kuyruğa sahip olan M/M/1 varışları ve servis süreleri Markov olduğu için hafızasız (memoryless) olarak nitelendirilmektedir. M/M/1 kuyruğunun servis süresinin dağılım fonksiyonu;

$$F_S(x) = 1 - e^{-\mu x} \tag{1}$$

denklemlerle gösterilmektedir [20].  $\rho$ , verim faktörü (utilization factor) olmak üzere ortalama bekleme zamanı denklemleri,

$$E[W] = \frac{\rho}{\mu(1 - \rho)} \tag{2}$$

ifadesiyle ve ortalama servis süresi de;

$$E[T] = \frac{1}{\mu(1 - \rho)} \tag{3}$$

şeklinde yazılmaktadır [45].

Tek sunuculu kuyruklarda, sunucu meşgul ise yeni gelen müşteriler kuyruktaki beklemek zorundadır [45]. M/M/∞ ve M/G/∞ gibi kuyruk sistemlerinde, n adet müşteri için n adet sunucu çalışacağından dolayı kuyruk oluşturulmasına gerek olmayacaktır. Bu tür kuyruklara, hiçbir kuyruk oluşturmamalarına rağmen sonsuz sunuculu kuyruk adı verilmektedir [20].

M/G/1 kuyruk sisteminde, t anında sistemde bulunan müşteri sayısı  $N(t)$  Markov işlemiyle ifade edilememektedir [20]. Bu zorluğu Markov olmayan yoldan çözmek için, genel servis süresi dağılımının üstel dağılımlı sunuculara dönüştürülmesi işlemi uygulanmaktadır. Diğer bir yaklaşım ise, gömülü Markov zinciri (embedded Markov chain) kullanmaktır. M/D/1 kuyruk sisteminde, tüm müşterilerin servis sürelerinin sabit olduğu varsayılmaktadır. Bu yüzden,  $u(x)$  adım fonksiyonu ve  $\mu^{-1}$  servis süresi olmak üzere servis süresinin dağılım fonksiyonu,

$$F_S(x) = u(x - \mu^{-1}) \tag{4}$$

şeklinde yazılmaktadır [20].

G/M/1 kuyruk modeli; genel dağılımlı varışa, üstel servis süresi dağılımına ve tek bir sunucuya sahiptir [45]. Servis süresi  $S$ , ortalama ile üstel dağılımlıdır ve varışlar arası süre  $X$  genel dağılımlıdır. Buna göre, genel dağılım fonksiyonu;

$$F_X(x) = P[X \leq x] \tag{5}$$

şeklinde ifade edilmektedir [20].

G/G/1 kuyruk sisteminde hem varışlar arası zaman hem de servis süreleri genel dağılımlıdır. Bu kuyruk dağılımını bulmak için kullanılacak belirli bir analitik model yoktur [20]. Hizmet için bekleyen bir kuyruk oluşturulduğunda, basit ve mantıklı olmasından dolayı genellikle FCFS (First Come First Served – İlk Gelen İlk Hizmet Alır) ya da FIFO (First in First out – İlk Giren İlk Çıkar) kuralı kullanılmaktadır. Bununla birlikte, uygulamada bazı öncelik tekniklerinin FCFS kuralına tercih edildiği birçok durum bulunmaktadır.

Engelsiz (non-preemptive) öncelik yaklaşımına göre, kuyruktaki bir müşteri sadece mevcut hizmet alan müşterinin hizmet alması tamamen bittikten sonra seçilir [10]. Engelsiz öncelik tekniğinde, bir sonraki hizmet alacak müşteri kuyruktaki en yüksek öncelikli müşteri olur ve aynı öncelik sınıfı olması durumunda FCFS kuralı uygulanır. Engelsiz (non-preemptive) öncelik kuyruğunda hizmet alan bir müşteriye, daha yüksek öncelikli bir müşteri gelse dahi engelsiz bir şekilde iletimini tamamlamasına izin verilir ve sunucu müsait olduğunda en yüksek öncelik sınıfındaki ilk müşteri hizmet alır. Normal şartlarda, öncelik-1 en yüksek öncelik sınıfıdır ve öncelik sayı numarası arttıkça öncelik sınıfı azalmaktadır.

Engelli (preemptive) öncelik tekniğine göre, daha yüksek öncelikli bir müşteri geldiğinde mevcut müşterinin iletimi kesilir [53]. Bu öncelik tekniğinde, engellenen kullanıcıların iletimlerine nasıl devam edecekleri ile ilgili farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Eğer engellenen müşteri hizmet kesildiği noktadan iletimine devam edebiliyorsa, bu kurala engelli devam (preemptive resume) eden adı verilmektedir. Eğer hizmet hangi noktada kesildiğine ve kaç kez hizmetin engellendiğine bakılmaksızın tekrarlanacaksa, bu kurala da engelli özdeş tekrarı (preemptive repeat identical) adı verilmektedir.

### 3.2. Öncelik Tabanlı Yaklaşımların Literatür Taraması

Bilişsel radyo ağları tabanlı spektrum el değiştirme işlemi ile ilgili olarak literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Son zamanlarda, öncelik sınıflarının kullanıldığı spektrum el değiştirme işlemiyle ilgili çalışmalarda da büyük artış görülmüştür. Wang ve Wang [44] tarafından, çoklu spektrum el değiştirmeden kaynaklanan toplam servis süresini en az indirmek için hedef kanalların nasıl seçileceği konusu tartışılmıştır. Ayrıca, farklı hedef kanallarının seçiminde toplam servis süresini değerlendirmek için PRP M/G/1 kuyruk ağ modeli önermişlerdir.

Wang ve ark. [46] tarafından, bilişsel radyo ağlarında çoklu spektrum el değiştirme gecikmesinin etkisinin nasıl karakterize edileceği üzerine çalışılmıştır. Ortamda birincil kullanıcı faaliyeti gerçekleşeceği zaman, ikincil kullanıcılar için spektrum el değiştirme işlemi başlatılmaktadır. Spektrum sezme sayesinde, ikincil kullanıcının yarım kalan iletimine devam edebilmesi için önceden tanımsız şekilde spektrum el değiştirme yapacağı hedef kanala karar verilmektedir. Yaptıkları çalışmada, çoklu el değiştirme gecikmesini karakterize etmek amacıyla PRP M/G/1 kuyruk ağ ile entegre bir şekilde çalışan Markov geçiş modeli geliştirilmiştir. Çoklu el değiştirme gecikmesi; sezme zamanı, anlaşma (handshaking) zamanı, kanal değiştirme zamanı ve bekleme zamanından oluşmaktadır.

Song ve Xie [41] tarafından, bilişsel radyo tasarsız (ad-hoc) ağlarda önceden tanımlı spektrum el değiştirme yaklaşımı önerilmiştir. Önerdikleri yaklaşımda, kanal değiştirme politikası ve önceden tanımlı spektrum el değiştirme protokolü, girişimi önlemek amacıyla kanalda birincil kullanıcı faaliyeti başlamadan önce spektrum el değiştirmenin gerçekleşmesini sağlamaktadır.

Liu ve ark. [25] spektrum el değiştirme, spektrum boşluklarının olasılık modeli ve bilişsel radyo kullanıcılarının davranışlarını incelemişlerdir. Ayrıca, çalışmalarında spektrum el değiştirme zaman ilişkisi modeli de önerilmiştir. Bunun yanında, spektrum el değiştirme etkisi ve bilişsel radyo kullanıcılarının spektrum el değiştirme için harcadığı servis süresi de araştırılmıştır.

Xie ve ark. [50], ikincil kullanıcıların performansının düşmesine sebep olan tekrarlı spektrum el değiştirme problemini çözmek için çok hücreli spektrum el değiştirme tekniği önermişlerdir. Wang ve ark. [47] tarafından, bilişsel radyo ağlarında en uygun hedef kanal seçimi için en düşük birikimli el değiştirme gecikmesinin nasıl belirleneceği çalışılmıştır. İkincil kullanıcı iletimi sırasında çoklu spektrum el değiştirmeye maruz kaldığında, diğer kullanıcıların yanında ikincil kullanıcı da en uygun hedef kanal seçimi işlemine dahil olmalıdır. Coutinho ve ark. [7] tarafından, birincil kullanıcı tespitinde hataların varlığını göz önüne alan yeni bir spektrum el değiştirme yaklaşımı önerilmiştir. Böylece, spektrum kullanım verimliliği ve birincil kullanıcı girişimi açısından daha iyi bir kanal düzeni sağlanmaktadır.

Wang ve Wang [45] tarafından, bilişsel radyo ağlarında çoklu el değiştirmenin kanal verimliliği ve gecikme performansına olan etkisini değerlendirmek için analitik bir çerçeve sunulmuştur. İkincil kullanıcının iletimi sırasında, birincil kullanıcıların sebep olduğu çoklu kesintiler çoklu spektrum el değiştirme ile sonuçlanmaktadır. Her bir spektrum el değiştirme işlemi için hedef kanallara karar vererek yarım kalan iletimlere devam etmek amacıyla anlık önceden tanımsız şekilde geniş bant sezme gerçekleştirilmektedir. Bilişsel radyo kullanıcıların kanal kullanım davranışlarını karakterize etmek için PRP M/G/1 kuyruk modeli kullanılmıştır.

Zahed ve ark. [53], önerdikleri modelin toplam servis süresini değerlendirmek için öncelikli önceden tanımlı spektrum el değiştirme karar mekanizması önermişlerdir. Önerdikleri teknik, PRP M/M/1 kuyruk kullanılarak modellenmiştir. Bu tekniğe göre, iletimi kesilen ikincil kullanıcılar diğer ikincil kullanıcılardan daha yüksek önceliğe sahiptirler.

Fahimi ve Ghasemi [10] tarafından, bilişsel radyo ağlarında çoklu spektrum el değiştirmenin ikincil kullanıcıların veri iletim zamanını nasıl etkilediği incelenmiştir. Önerdikleri yaklaşımda, lisanslı kanalda birincil kullanıcıların varlığı tespit edildiğinde, spektrum el değiştirme işlemi başlatılarak ikincil kullanıcının iletimi kesilerek kanal birincil kullanıcıya bırakılmaktadır. Yaptıkları çalışmada, spektrum el değiştirme gerçekleşme oranı incelenmiştir ve ikincil kullanıcıların çoklu el değiştirme işlemini ve veri iletim zamanını karakterize etmek için PRP M/G/1 kuyruk modeli kullanılmıştır. İkincil kullanıcı iletim yaptığı sırada bir el değiştirme işlemi gerçekleşirse, el değiştirmeye maruz kalan ikincil kullanıcı diğer ikincil kullanıcılardan daha yüksek önceliğe sahip olmaktadır.

M.E. BAYRAKDAR, A. ÇALHAN

Tianwei ve ark. [43], kapsamlı bir maliyet tabanlı spektrum el değiştirme algoritması önermişlerdir. Yaptıkları çalışmada, iletim gecikmesi, kanal bant genişliği SNR ve kullanıcı karakteristiği gibi çoklu parametreler bir arada kullanılarak kanal seçimi gerçekleştirilmektedir. Böylece, sistem performansını ölçerken tüm bu faktörler göz önünde bulundurulmaktadır. Zahed ve ark. [52] tarafından, el değiştirme gecikmesini azaltmak için lisanslı ve lisanssız kullanıcıların bir arada bulunduğu öncelikli spektrum el değiştirme karar mekanizması önerilmiştir. Önerilen teknikteki lisanslı kanallar PRP M/M/C kuyruk kullanılarak modellenmiştir. Bununla birlikte, lisanssız kanallar M/M/C tekrarlı öncelik kuyruğu kullanılarak modellenmiştir. Sistemin genel performansını değerlendirmek için el değiştirme ve ikincil kullanıcıların aynı ve farklı önceliklere sahip olduğu durumlar ele alınmıştır.

Mahamuni ve ark. [28], spektrum el değiştirme işlemi algoritmasının tasarımı için spektrum sezme sonuçlarına dayanan gerçek zamanlı deneysel bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşım sayesinde, bilişsel radyo ağlarında el değiştirme mekanizmasının spektrum el değiştirme gecikmesi en aza indirilmiştir. Chinh Chu ve ark. [3] tarafından, bilişsel radyo ağlarında öncelikli trafiğin göz önüne alındığı dinamik spektrum erişim tekniği geliştirilmiştir. Geliştirdikleri teknike; birincil kullanıcılar, birinci sınıf ikincil kullanıcılar ve ikinci sınıf ikincil kullanıcılar olmak üzere üç farklı trafik bulunmaktadır. Birincil kullanıcılar en yüksek önceliğe sahiptir. Birinci sınıf ikincil kullanıcılar ise ikinci sınıf ikincil kullanıcılardan daha yüksek önceliğe sahiptirler.

Zhang ve Yeo [54], çoklu kullanıcı bilişsel radyo ağları için ardışık sezme tabanlı spektrum el değiştirme tekniği önermişlerdir. İlk olarak, her ikincil kullanıcı için uygun aday kanallar seçilmektedir. Sonra, dinamik programlamaya dayanan ardışık sezme sayesinde en iyi el değiştirme kanalı belirlenmektedir. Sayyadi ve Nourinia [38], ardışık spektrum sezme tekniğinin modellenmesini ve performans değerlendirmesini yapmışlardır. Bununla birlikte, iletim fırsatı bulmak için gereken ortalama el değiştirme sayısı üzerine çalışmışlardır.

### 3.3. Bilişsel Radyo Ağlarında Yapay Zekâ Teknikleri

Yapay zekâ, bilgisayar tabanlı bir makinenin insana özgü nitelikleri yerine getirme yeteneği olarak tanımlanmaktadır [31]. Zekâ ise, insanın algılama, düşünme, akıl yürütme ve çıkarım yapma gibi yeteneklerinin tamamına verilen isimdir. Zekânın temelini bilgi oluşturmaktadır. Bu yüzden, zekâyı anlayabilmek için bilginin de tanımlanması gerekmektedir. Bilgi, duyu organları aracılığıyla alınan ve daha önce var olan bir nesne ile karşılaştırılarak gerçekleştirilen olgudur. Bu olgu sadece önceden bilinen diğer nesnelere sürdürdüğü ilişkiler sayesinde tanımlanabilmektedir.

Yapay zekâ araştırmaları, insan beyninin görevlerinin incelenmesi ile yakından ilişkilidir. Beynin çalışması; bilginin girişi, sentezleme ve kıyaslama, çıkış ve eylem olmak üzere üç bölüme ayrılmaktadır [31]. Sinir sistemi, genel olarak çevresel sinir sistemi ve merkezi sinir sistemi olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Merkezi sinir sistemi, insan vücudunun bütün davranış ve işlevlerini yönetirken; çevresel sinir sistemi ise beyin ve omuriliği ilişkilendiren sinirlerden oluşmaktadır.

Uzman sistemler, belirli bir konu üzerinde bir veya daha fazla sayıda insanın yapabildiği yargılama ve karar verme işlemlerini modelleyen bir yazılım sistemidir [31]. İnsan, hayatı boyunca yeni bilgiler edinerek görüşlerini değiştirebilmektedir. Uzman sistemler de aynı şekilde yeniden programlanmaya ihtiyaç duymadan bilgi tabanını güncelleyebilmelidir. Bir sistemin uzman sistem olabilmesi için, kullanıcı hatalarını algılama ve kullanıcıyı yönlendirme gibi özelliklerinin de bulunması gerekmektedir.

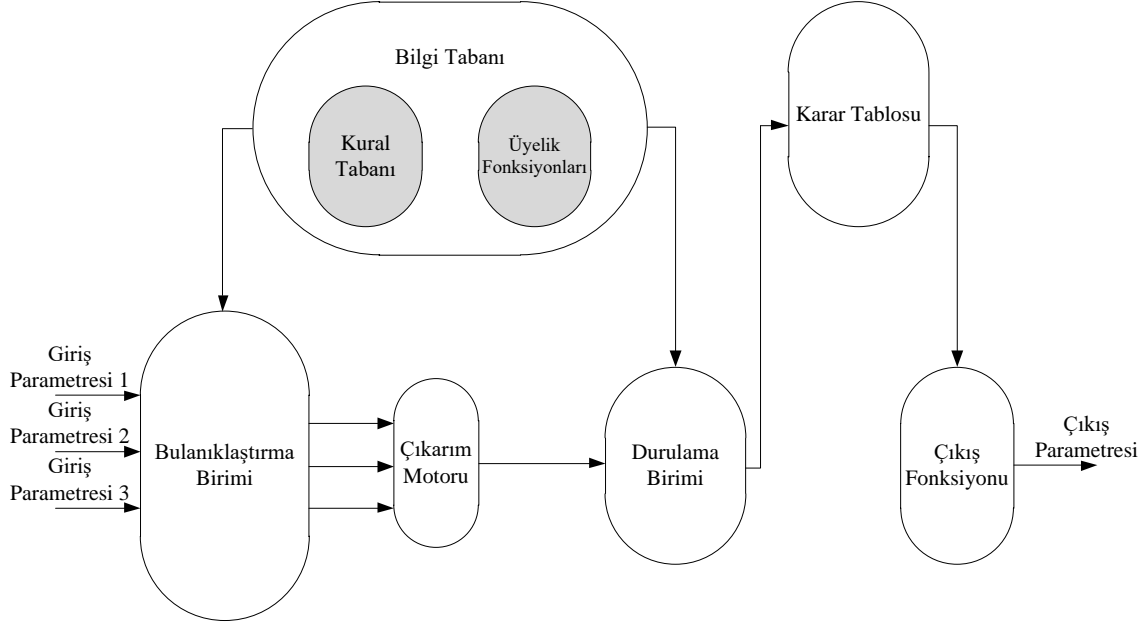
Uzman sistemlerde; bilgi tabanı, uzman, bilgi kazanma modülü, veri tabanı, mantıksal sonuçlandırma mekanizması, yardımcı yorumlama modülü, kullanıcı arabirimi ve kullanıcı bulunmaktadır [31]. Bilgi tabanı, bilgilerin saklandığı ve mevcut bilgilerden yeni bilgilerin üretildiği birimdir. Uzmanın asıl görevi, sisteme yeni bilgiler sağlamaktır. Bilgi kazanma modülü, uzman tarafından sağlanan bilgileri bilgi tabanında uygun bir yere yerleştirmekten sorumludur. Veri tabanı, bilgi tabanı ile ilişkili şekilde çalışmaktadır ve temel özellikleri tutmaktadır. Mantıksal sonuçlandırma mekanizması, bilgi tabanında araştırma yaparak kendisine verilen mantıksal önermelerin doğruluğunu araştırmakla yükümlüdür. Yardımcı yorumlama modülü, mantıksal sonuçlandırma mekanizmasına yardımcı olarak çalışmaktadır. Kullanıcı arabirimi, kullanıcının sorularını mantıksal sonuçlandırma mekanizmasının anlayabileceği biçime dönüştürmekten sorumludur. Kullanıcı ise, sonucunu almak istediği önermeleri sisteme veren ve bunlara cevap alan bir kişidir.

Yapay sinir ağları, insan beyninin işlevinin modellenmesi olarak bilinmektedir [31]. Fakat doğal sinir ağları ile yapay sinir ağları arasında yapı ve kapasite bakımından oldukça farklılıklar bulunmaktadır. Ayrıca, gerçek beyin fonksiyonlarını yerine getirmek için yeterli bilgi mevcut değildir. Bu yüzden, öğrenmeyi gerçekleştiren elemanların seçimi büyük önem taşımaktadır.

Genetik algoritmalar, en iyinin korunumu ve doğal seçim ilkesinin benzetim yoluyla bilgisayarlara uygulanması ile elde edilen bir arama yöntemidir [31]. Aday sonuçların eşit boyutlu vektörler olarak ifade edilmesinin ardından belirli büyüklükte bir popülasyon oluşturulur. Kromozom adı verilen bu vektörler yeni

nesiller oluşturarak değişikliklere uğrarlar. Her yeni nesilde, kromozomların iyiliği ölçülür ve bir sonraki nesil oluşturulurken bazı kromozomlar çaprazlanıp mutasyona uğratılabilir.

Karınca algoritmaları, karıncaların davranışlarını taklit eden popülasyon tabanlı yaklaşımlardır [31]. Bu algoritmanın temelini, karıncaların yiyecek bulmakta kullandıkları davranışlar oluşturmaktadır. Karıncalar tek başlarına çok üstün yeteneklere sahip olmamalarına rağmen birlikte hareket ettiklerinde çok karmaşık işlemlere karşı zekice çözümler üretebilmektedirler. Bir karıncanın yapılacak iş hakkında bilgisi olmamasına rağmen karıncalar arasındaki organizasyon ve dolaylı iletişim sonucunda zekice bir davranış ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3. Bulanık mantık örnek blok diyagramı

Şekil 3'te, örnek bir bulanık mantık blok diyagramı gösterilmektedir. Bir bulanık mantık sisteminde temel olarak, bulanıklaştırma, çıkarım motoru ve durulama birimleri bulunmaktadır. Bulanıklaştırma biriminin görevi, gelen değerleri üyelik fonksiyonları yardımıyla dilsel değişkenlere çevirmektir. Dilsel değişkenlere dönüştürülen değerler daha sonra bulanık çıkarım motorunda işlenmektedir. Son olarak durulama biriminde ise, bulanık mantık çıkarım motorunun çıkışından elde edilen değerleri sayısal değerlere çevirmektedir [31].

Bulanık mantık genel olarak insan düşüncesine özde işlemlerin gerçekleşmesini sağlamakla ve kesin olmayan verileri modellemede kullanılmaktadır [31]. Bildiğimiz mantıksal bir önerme sisteminde sadece doğrular ve yanlışlar vardır. Fakat bulanık mantık sisteminde olayların ne derece doğru ve yanlış olduğu da bilinmelidir. Örneğin; 100 derecedeki suyun sıcaklığı "sıcak" olarak ifade edilirse 80 derecedeki su için "sıcak değildir" ifadesi doğru olmadığı gibi yanlış da değildir. Bulanık mantık teorisi; az, sık, orta, düşük, yüksek, az yüksek gibi dilsel terimleri kullanarak dereceli veri modellemesi gerçekleştirmektedir [29, 31]. Bu şekilde, olayların modellenmesinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilir. Bulanık küme, kesin geçişleri eleyerek belirsizliği yeniden tanımlar ve üyelik derecelerine göre matematiksel tanımlamalar yapar. Bireyler, bu sistemdeki üyelik derecelerine göre farklı değerlere farklı oranlarda üye olabilirler.

### 3.4. Yapay Zekâ Tabanlı Yaklaşımların Literatür Taraması

Bilişsel radyo ağları tabanlı spektrum el değiştirme işlemi ile ilgili olarak literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Son zamanlarda, yapay zeka tekniklerinin kullanıldığı spektrum el değiştirme işlemiyle ilgili çalışmalarda da büyük artış görülmüştür. Sheikholeslami ve ark. [39] bilişsel radyo ağlarının spektrum el değiştirme işlemi için başlangıç ve hedef kanallarının belirlendiği olasılıklı bir yaklaşım önermişlerdir. Yaptıkları çalışmada, ağ yapısını karakterize etmek için hem kuyruk teorisi hem de el değiştirme süreci göz önünde bulundurulmuştur [39].

Zang [55], spektrum el değiştirme performansını karakterize etmek için; bağlantı (link maintenance) olasılığı, spektrum el değiştirme sayısı, el değiştirme gecikmesi ve tamamlanmama olasılığı olmak üzere dört parametre önermiştir. Yaptığı çalışmada özellikle, olasılık kütle fonksiyonu ve ortalama spektrum el değiştirme sayısını

M.E. BAYRAKDAR, A. ÇALHAN

geliştirmiştir. Bunun yanında, hem fırsatçı hem de uzlaşmaya varılmış spektrum erişim stratejilerini incelemiştir. Raiyn [36] tarafından, hücreli sistemlerde gecikme analizi yapılmıştır. Ayrıca, gereksiz el değiştirme işleminden kaynaklanan gecikmeyi azaltmak için bilişsel radyoya dayanan yeni bir el değiştirme yönetimi önermiştir.

Kalil ve ark. [18] tarafından, bağlantı olasılığı (link maintenance probability) ve beklenen spektrum el değiştirme sayısının göz önüne alındığı destek kanallı fırsatçı spektrum erişimi (Opportunistic Spectrum Access with Backup Channels - OSAB) performansının değerlendirilmesi için kapsamlı bir matematiksel model önerilmiştir. Guo ve ark. [14] tarafından, destek vektör makinelerine (Support Vector Machines - SVM) dayanan yeni bir spektrum el değiştirme yönetim tekniği önerilmiştir. Daha iyi spektrum sezme sonuçları elde etmek amacıyla, işbirlikli spektrum sezme mekanizması kullanılmıştır. Ayrıca, SVM modeli el değiştirme tahminleri için kullanılmıştır. Böylece, ikincil kullanıcı kanal meşgul olmadan önce el değiştirme için hazırlanabilmektedir.

Zheng ve ark. [56], bilişsel radyo ağlarında önceden tanımsız karar mekanizmalı spektrum el değiştirme işlemi için ardışık hedef kanal seçim tekniği önermişlerdir. Bu teknik yardımıyla, spektrum el değiştirme başarısızlık olasılığı en aza indirilmektedir. Qiao ve ark. [35] tarafından, spektrum sezme ve spektrum el değiştirme etkileşimini göz önüne alan birleştirilmiş optimizasyon tekniği önerilmiştir. Özellikle spektrum sezme performans parametreleri olan yanlış alarm olasılığı ve yanlış sezme olasılığı spektrum el değiştirme sırasındaki olumsuz etkiyi azaltmak için göz önüne alınmıştır.

Wu ve ark. [49] tarafından, spektrum giriş izni kontrollü yeni bir spektrum el değiştirme tekniği önerilmiştir. Önerilen tekniğe göre, ikincil kullanıcılar kendi aralarında grup oluşturarak birincil kullanıcıların sinyallerini tespit etmektedirler. Spektrum el değiştirme performansını analiz etmek için basit bir Markov modeli kullanılmıştır. Sistemin çıkışında; engel olma olasılığı, zorunlu bitirme olasılığı ve bilişsel radyo ağının iş çıkarma oranı parametreleri incelenmiştir.

Mardeni ve ark. [29], bilişsel radyo kullanıcısının lisanslı kanalı birincil kullanıcıya bıraktığı spektrum el değiştirmeye odaklanmışlardır. Bunun yanında, bilişsel radyo kullanıcısı spektrum el değiştirme gerçekleştirmek yerine iletim gücünü ayarlayarak koruma sağlayabilmektedir. Bu şekilde, ikincil kullanıcı sadece iletim gücünü belirli limitlerde ayarlayamadığı durumlarda spektrum el değiştirme gerçekleştirmektedir.

Soleimani ve ark. [40] tarafından, bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme oranını azaltmayı ve ikincil kullanıcıların toplam iş çıkarma oranını artırmaya dayanan dinamik bir spektrum el değiştirme işlemi önerilmiştir. Gizli Markov Modeli yardımıyla her bir ikincil kullanıcı geçmiş gözlemlere dayanarak birincil kullanıcı aktivitelerini tahmin etmektedir. Bu modele göre, ikincil kullanıcılar herhangi bir çarpışmaya sebep olmadan kanallarını değiştirebilmektedirler. Lertsinsrubtavee ve ark. [22] tarafından, bilişsel radyo ağlarında dinamik spektrum paylaşımı için sezgisel bir yaklaşım önerilmiştir. İkincil kullanıcıların spektrum el değiştirme işleminde belirli bir oranı yakalaması için telafi oranı (rate compensation) kavramı tanıtılmıştır.

Park ve ark. [34] tarafından, küme tabanlı bilişsel radyo algılayıcı ağlarda yeni bir olasılıklı spektrum el değiştirme sistemi sunulmuştur. Sistemin başarımını analiz etmek için zorunlu sonlandırma olasılığı ve engel olma olasılığı parametreleri incelenmiştir. Lee ve Yeo [21], bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme için; spektrum el değiştirme gecikmesi ve kanal boşluk durumunun kararlı durum (steady-state) analizini sunmuşlardır. Ayrıca; spektrum sezme zamanı, veri iletim zamanı ve birincil kullanıcı sinyallerinin durum geçiş oranları üzerinde çalışmışlardır.

Liu ve ark. [26] tarafından, taşma (overflow) kuyruk teorisine dayanan akıllı bir spektrum el değiştirme stratejisi önerilmiştir. Bu strateji, tüm lisanslı kanallar kullanılıyor durumunda ve değiştirme kuyruğu (switching queue) ikincil kullanıcılarla dolu olduğu durumlarda birincil kullanıcının sisteme entegre olma sorununu çözme hedeflemektedir.

NoroozOliaee ve ark. [33], ikincil kullanıcıların sadece bitişik kanallara el değiştirme gerçekleştirebildiği gerçekçi el değiştirmeyi göz önüne alan bilişsel radyo ağlarının performansını incelemiştir. İkincil kullanıcıların zorunlu bitirme olasılığını (forced termination) ve engel olma olasılığını (blocking probability) analiz etmek için sürekli (continuous) Markov modelini kullanmışlardır.

#### 4. SONUÇLAR

Kablosuz bilişsel radyo, spektrum bantlarından fırsatçı bir biçimde yararlanılmasını sağlayan güncel bir ağ teknolojisidir. Kablosuz bilişsel radyo teknolojisinin en önemli özelliği, ikincil kullanıcıların spektrumu sezmesini sağlaması ve gerçek zamanlı olarak çevresindeki değişikliklere adapte olmasıdır. Kablosuz bilişsel radyo ağlarındaki ikincil kullanıcılar bu teknoloji sayesinde, herhangi bir zamanda birincil kullanıcılara girişim oluşturmadan boş olan spektrum bantlarını kullanabilmektedirler. İkincil kullanıcıların kullanılmayan spektrum bantları üzerinden haberleşme gerçekleştirmesi ve gerektiğinde bu spektrum bantları arasında bağlantılarını aktarması spektrum el değiştirme işlemi olarak nitelendirilmektedir. Bu çalışmada, bilişsel radyo ağlarında

spektrum el değiştirme için yapay zeka teknikleri ve öncelik sınıfları ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bunun yanında, spektrum el değiştirme işleminde öncelik kuyruklarının analitik modelleri ve yapay zeka karar mekanizmaları sunularak bu alanda geliştirilebilecek yeni algoritmalar için temel oluşturulmuştur.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından 2016.07.02.514 numaralı proje ile desteklenmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] AKYILDIZ, I.F., LEE W.Y., VURAN, M.C., MOHANTY, S., “NeXt Generation / Dynamic Spectrum Access / Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey”, *Computer Networks*, 50, 2127-2159, 2006.
- [2] BİÇEN, A., PEHLİVANOĞLU, E., GALMES, S., AKAN, O., “Dedicated Radio Utilization for Spectrum Handoff and Efficiency in Cognitive Radio Networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14, 5251-5259, 2015.
- [3] CHINH CHU, T.M., PHAN, H., ZEPERNICK, H.J., “Dynamic Spectrum Access for Cognitive Radio Networks with Prioritized Traffics”, *IEEE Communications Letters*, 18, 1218-1221, 2014.
- [4] CHRISTIAN, I., MOH, S., CHUNG, I., LEE, J., “Spectrum mobility in cognitive radio networks”, *IEEE Communications Magazine*, 50, 114-121, 2012.
- [5] CHU, J.H., MA, R.T., FENG, K.T., “Stochastic Spectrum Handoff Protocols for Partially Observable Cognitive Radio Networks”, *Wireless Networks*, 20, 1003-1022, 2014.
- [6] CORDEIRO, C., CHALLAPALI, K., BIRRU, D., SAI SHANKAR, N., “IEEE 802.22: The First Worldwide Wireless Standard based on Cognitive Radios”. *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, 328-337. Baltimore, USA, 2005.
- [7] COUTINHO, P.S., ROCHA DA SILVA, M.W., DE REZENDE, J.F., “Detection Error Aware Spectrum Handoff Mechanism for Cognitive Radios”, *International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, 48-53. Stockholm, Sweden, 2012.
- [8] MITOLA, J., MAGUIRE, G.Q.J., “Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal”, *IEEE Personal Communications*, 6, 13-18, 1999.
- [9] DAHI, S., TABBANE, S., “Handoff Reducing Model for Multichannel Access in Cognitive Radio Networks”, *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, 1780-1785. Sardinia, Italy, 2013.
- [10] FAHIMI, M., GHASEMI, A., “Analysis of the PRP M/G/1 Queuing System for Cognitive Radio Networks with Handoff Management”, *Iranian Conference on Electrical Engineering*, 1047-1051. Tehran, Iran, 2014.
- [11] FENG, W., CAO, J., ZHANG, C., LIU, C., “Joint Optimization of Spectrum Handoff Scheduling and Routing in Multi-Hop Multi-Radio Cognitive Networks”, *IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, 85-92. Montreal, Canada, 2009.
- [12] FENG, W., CAO, J., ZHANG, C., ZHANG, J., XIN, Q., “Coordination of Multi-Link Spectrum Handoff in Multi-Radio Multi-Hop Cognitive Networks”, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 72, 613-625, 2012.
- [13] FLORES, A.B., GUERRA, R.E., KNIGHTLY, E.W., ECCLESINE, P., PANDEY, S., “IEEE 802.11af: A Standard for TV White Space Spectrum Sharing”, *IEEE Communications Magazine*, 51, 92-100, 2013.
- [14] GUO, J., JI, H., LI, Y., LI, X., “A Novel Spectrum Handoff Management Scheme based on SVM in Cognitive Radio Networks”, *International ICST Conference on Communications and Networking in China*, 645-649. Harbin, China, 2011.
- [15] HAYKIN, S., “Cognitive Radio: Brain Empowered Wireless Communications”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23, 201-220, 2005.
- [16] HOSSAIN, A., SARKAR, N.I., *Spectrum Handoff Management in Cognitive Radio Networks: Solutions, Modeling, and Future Directions*. In N. MEGHANATHAN, Y.B. REDDY (Eds.), *Cognitive Radio Technology Applications for Wireless and Mobile Ad Hoc Networks* (pp. 103-123), Book News Inc., Portland, USA, 2013.
- [17] JUNG, S., LEE, C., “Wireless LAN Handoff Module Implementation to OPNET Simulator and Handoff Performance Analysis”, *International Conference on Advanced Communication Technology*, 151-156. Phoenix Park, Korea, 2004.

M.E. BAYRAKDAR, A. ÇALHAN

- [18] KALIL, M.A., AL MAHDI, H., MITSCHLE THIEL, A., "Spectrum Handoff Reduction for Cognitive Radio Ad Hoc Networks", International Symposium on Wireless Communication Systems, 1036-1040. York, UK, 2010.
- [19] KANG, H., LEE, D., JEONG, B.J., KIM, A.C., "Coexistence between 802.22 and 802.11af over TV White Space", International Conference on ICT Convergence, 533-536. Seoul, South Korea, 2011.
- [20] KOBAYASHI, H., MARK B.L., System Modeling and Analysis: Foundations of System Performance Evaluation (1st ed.), Prentice Hall Press, New Jersey, USA, 2008.
- [21] LEE, D., YEO, W., "Channel Availability Analysis of Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks", IEEE Communications Letters, 19, 435-438, 2015.
- [22] LERTSINSRUBTAVEE, A., MALOUCH, N., FDIDA, S., "Efficient Dynamic Spectrum Sharing through Rate Compensation and Spectrum Handoff", Proceedings IEEE INFOCOM, 19-20. Turin, Italy, 2013.
- [23] LERTSINSRUBTAVEE, A., MALOUCH, N., FDIDA, S., KANCHANASUT, K., "Spectrum Sharing and Impact on Spectrum Handoff in Multi-Channel Cognitive Radio Networks", IEEE International Symposium and Workshops on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 1-6. Madrid, Spain, 2013.
- [24] LIANG, Y.C., CHEN, K.C., LI, G.Y., MAHONEN, P., "Cognitive Radio Networking and Communications: An Overview", IEEE Transactions on Vehicular Technology, 60, 3386-3407, 2011.
- [25] LIU, H.J., WANG, Z.X., LI, S.F., YI, M., "Study on the Performance of Spectrum Mobility in Cognitive Wireless Network", IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, 1010-1014. Guangzhou, China, 2008.
- [26] LIU, Y., PEI, B., WANG, H., "An Intelligent Spectrum Handoff Scheme based on Overflow Queuing Theory in Cognitive Radio Networks", URSI General Assembly and Scientific Symposium, 1-4. Beijing, China, 2014.
- [27] MA, R.T., HSU, Y.P., FENG, K.T., "A POMDP based Spectrum Handoff Protocol for Partially Observable Cognitive Radio Networks", IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 1-6. Budapest, Hungary, 2009.
- [28] MAHAMUNI, S.M., MISHRA, V., FERNANDES, R., "Detection of Spectrum in Cognitive Radio Network for Efficient Spectrum Handoff Mechanism", International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking, 1-6. Surat, India, 2014.
- [29] MARDENI, R., ANUAR, K., HAFIDZOH, M., ALIAS, M.Y., MOHAMAD, H., RAMLI, N., "Efficient Handover Algorithm using Fuzzy Logic Underlay Power Sharing for Cognitive Radio Wireless Network", IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications, 53-56. Kuching, Malaysia, 2013.
- [30] WANG, J., GHOSH, M., CHALLAPALI, K., "Emerging Cognitive Radio Applications: A Survey", IEEE Communications Magazine, 49, 74-81, 2011.
- [31] NABIYEV, V.V., Yapay Zeka (beşinci baskı), Seçkin Yayıncılık, Ankara, Türkiye, 2012.
- [32] NEJATIAN, S., SYED YUSOF, S.K., LATIFF, N.M.A., ASADPOUR, V., "Integrated Handoff Management in Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks", IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, 2887-2892. London, UK, 2013.
- [33] NOROOZOLIAEE, M., HAMD AOUI, B., CHENG, X., ZNATI, T., GUIZANI, M., "Analyzing Cognitive Network Access Efficiency under Limited Spectrum Handoff Agility", IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63, 1402-1407, 2014.
- [34] PARK, J.H., NAM, Y., CHUNG, J.M., "Analysis of Channel Access with Spectrum Handoff in Cluster based Cognitive Radio Sensor Networks", International Conference on ICT Convergence, 232-233. Jeju, South Korea, 2013.
- [35] QIAO, X., TAN, Z., LI, J., "Combined Optimization of Spectrum Handoff and Spectrum Sensing for Cognitive Radio Systems", International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 1-4. Wuhan, China, 2011.
- [36] RAIYN, J., "Developing Cognitive Radio Approach based on Dynamic SNR to Reduce Handoff Latency in Cellular Systems", International Symposium on Performance Evaluation of Computer & Telecommunication Systems, 231-237. Istanbul, Turkey, 2009.
- [37] RAWAL, C., SHARMA, M., "Implementation of Soft Handover in 3G using OPNET", International Conference on Optimization, Reliability, and Information Technology, 208-211. Faridabad, India, 2014.
- [38] SAYYADI S., NOURINIA, J., "Performance Evaluation of Sequential Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks: A Single-User Case", International Journal of Communication Systems, 27, 3768-3780, 2014.
- [39] SHEIKHOLESAMI, F., NASIRI KENARI, M., ASHTIANI, F., "Optimal Probabilistic Initial and Target Channel Selection for Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, 14, 570-584, 2015.

- [40] SOLEIMANI, M.T., KAHVAND, M., SARIKHANI, R., “Handoff Reduction based on Prediction Approach in Cognitive Radio Networks”, IEEE International Conference on Communication Technology, 319-323. Guilin, China, 2013.
- [41] SONG, Y., XIE, J., “Common Hopping based Proactive Spectrum Handoff in Cognitive Radio Ad Hoc Networks”, IEEE Global Telecommunications Conference, 1-5. Miami, USA, 2010.
- [42] STEVENSON, C., CHOUNARD, G., LEI, Z., HU, W., SHELLHAMMER, S.J., CALDWELL, W., “IEEE 802.22: The First Cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard”, IEEE Communications Magazine, 47, 130-138, 2009.
- [43] TIANWEI, W., YAFENG, W., CHAO, L., “A Spectrum Handoff Scheme based on Comprehensive Cost in Cognitive Radio System”, International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems, 1-5. Aalborg, Denmark, 2014.
- [44] WANG, C.W., WANG, L.C., “Modeling and Analysis for Proactive Decision Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks”, IEEE International Conference on Communications, 1-6. Dresden, Germany, 2009.
- [45] WANG, C.W., WANG, L.C., “Analysis of Reactive Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 30, 2016-2028, 2012.
- [46] WANG, C.W., WANG, L.C., ADACHI, F., “Modeling and Analysis for Reactive Decision Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks”. IEEE Global Telecommunications Conference, 1-6. Dresden, Germany, 2010.
- [47] WANG, L.C., WANG, C.W., CHANG, C.J., “Optimal Target Channel Sequence Design for Multiple Spectrum Handoffs in Cognitive Radio Networks”, IEEE Transactions on Communications, 60, 2444-2455, 2012.
- [48] WANG, S., TOSATO, F., COON, J., “Reliable Energy Efficient Spectrum Management and Optimization in Cognitive Radio Networks: How Often Should We Switch”, IEEE Wireless Communications, 20, 14-20, 2013.
- [49] WU, C., HE, C., JIANG, L., CHEN, Y., “A Novel Spectrum Handoff Scheme with Spectrum Admission Control in Cognitive Radio Networks”, IEEE Global Telecommunications Conference, 1-5. Kathmandu, Nepal, 2011.
- [50] XIE, X., YANG, G., MA, B., “Spectrum Handoff Decision Algorithm with Dynamic Weights in Cognitive Radio Networks”, Global Mobile Congress, 1-6. Shanghai, China, 2011.
- [51] YANG, S.F., WU, J.S., HUANG, J.W., “Spectrum Handover with Queues and Guard Channels in Cognitive Radio Networks”, Spring Congress on Engineering and Technology, 1-4. Xian, China, 2012.
- [52] ZAHED, S., AWAN, I., CULLEN, A., YOUNAS, M., “Performance Evaluation of Cognitive Radio Networks under Licensed and Unlicensed Spectrum Bands”, International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 329-336. Victoria, Canada, 2014.
- [53] ZAHED, S., AWAN, I., MIN, G., “Prioritized Proactive Scheme for Spectrum Handoff Decision in Cognitive Radio Networks”, International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications, 335-341. Victoria, Canada, 2012.
- [54] ZHANG, W., YEO, C.K., “Sequential Sensing based Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks with Multiple Users”, Computer Networks, 58, 87-98, 2014.
- [55] ZHANG, Y., “Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks: Opportunistic and Negotiated Situations”, IEEE International Conference on Communications, 1-6. Dresden, Germany, 2009.
- [56] ZHENG, S., YANG, X., CHEN, S., LOU, C., “Target Channel Sequence Selection Scheme for Proactive Decision Spectrum Handoff”, IEEE Communications Letters, 15, 1332-1334, 2011.