



Bilişsel Radyo Ağlarında Arabellek Tabanlı Kanal Tahsis Yaklaşımı ile İkincil Kullanıcı Çağrı Başarımlarının İyileştirilmesi

*Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 07.02.2024
Kabul/Accepted: 01.08.2024
Yayımlandı/Published: xx.xx.xxxx

Improving the Call Performance of Secondary Users by Utilizing a Buffer-Based Channel Allocation Approach in Cognitive Radio Networks

Sedat ATMACA*

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Muğla, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu makalede sunulan çalışmada, Birincil Kullanıcıların (BK) ve İkincil Kullanıcıların (İK) aynı iletişim alanı içerisinde birlikte bulunduğu ve İK'ların lisanslı spektrumu fırsatçı bir yaklaşımla kullandığı bir Bilişsel Radyo (BR) ağ modeli geliştirilmiş, analiz edilmiş ve başarımları eş bir ağ modeli ile karşılaştırmalı değerlendirilmiştir. Önerilen ağ modelinde spektrum yetersizliğinden çağrıları engellenen İK'lar ve yeni gelen BK çağrılarında dolayı bağlantısı düşen İK'lar için arabellek kullanımı öngörülmüştür. Önerilen BR ağ modelinin başarımları üç boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca, geliştirilen BR ağ modelinin Monte-Carlo benzetimi de gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlarla, analitik modelden elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. Önerilen modelde İK çağrı engelleme olasılığı, İK çağrı düşme olasılığı ve İK spektrum el-değiştirme olasılığı başarımları olarak benimsenmiştir. Karşılaştırmalı başarımlar sonuçlarına göre, İK varış hızı 2 olduğunda, İK çağrı engelleme olasılığında %55, İK çağrı düşme olasılığında %61 ve İK spektrum el-değiştirme olasılığında yaklaşık %50 oranında iyileştirme elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bilişsel Radyo; Kaynak Tahsisi; Başarım Analizi; Markov Zinciri.

Abstract

In this presented work, a Cognitive Radio (CR) network model where Primary Users (PUs) and Secondary Users (SUs) coexist within the same communication area and SUs utilize the licensed spectrum opportunistically was developed, analyzed, and its performance was comparatively evaluated with a peer network model. In the proposed CR network model, the buffer usage is envisaged for SUs whose calls are blocked due to limited spectrum and for SUs whose connections drop due to incoming PU calls. The performance of the proposed CR network model was analyzed using a three-dimensional continuous-time Markov chain. Additionally, a Monte Carlo simulation was developed for the CR network model, and the results obtained from the simulation model were validated by the results obtained from the analytical model. In the proposed model, SU call blocking probability, SU call dropping probability, and SU spectrum handover probability were considered as performance metrics. According to the comparative performance results, when the SU arrival rate is 2, an improvement of 55% in the SU call blocking probability, 61% in the SU call drop probability and approximately 50% in the SU spectrum handover probability is achieved.

Keywords: Cognitive Radio; Resource Allocation; Performance Evaluation; Markov Chain

1. Giriş

Günümüzde, teknolojinin hızla gelişimiyle birlikte, kablosuz haberleşme sistemleri her geçen gün daha yaygın kullanılmaktadır. Bununla birlikte, haberleşme sistemlerindeki bu hızlı gelişim ve kablosuz cihazların yaygınlaşması, spektrum yetersizliği sorununu da daha belirgin hale getirmiştir (Bayrakdar and Çalhan 2015, Haykin 2005, Mitola and Maguire 1999, Zhao and Sadler 2007). Haberleşme sistemlerindeki artan kullanıcı sayısı ve mevcut kablosuz frekans spektrumunun sınırlı olması sonucunda, iletişimde sorunlar (bağlantı kurulamaması,

bağlantılarda kesintiler, gecikme) yaşanabilmektedir. Geleneksel kablosuz spektrum tahsis tekniklerinde, sabit veya statik kanal tahsis yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, belirli bir kablosuz iletişim sistemi veya kullanıcı için spektrum kaynaklarının bir kısmının tahsis edilmesini ve sadece bu sistemlerin tahsis edilen kaynakların özel kullanım hakkına sahip olmasını sağlamaktadır. Ancak, geleneksel sabit kanal tahsis yaklaşımının bazı olumsuz yönleri vardır. Belirli frekans bantlarının statik olarak tahsisi, spektrumun etkin şekilde kullanılmasını engellemektedir (Mitola and Maguire 1999,

Haykin 2005). Tahsis edilen frekans kanalları, belirli zaman dilimlerinde veya belirli coğrafi bölgelerde kullanılmazken veya çok az kullanılırken, diğer zamanlarda veya bölgelerde aşırı yüklenebilmektedir. Diğer bir ifade ile, lisanslı spektrumun kullanımı konuma veya zamana bağlı olarak değişmektedir (Zhao 2007, Lee 2012, Qing 2011). Bu durum da spektrum verimliliğini azaltarak spektrum kıtlığı sorununa yol açmaktadır. Bu nedenle, dinamik spektrum yönetimi gibi yenilikçi yaklaşımlar, spektrumun daha esnek ve dinamik kullanılmasını ve böylece boşta olan frekans kanallarından daha etkin yararlanılmasını hedeflemektedir (Tang et al. 2012, Hassani and Berangi 2019).

Bilişsel Radyo (BR), kablosuz iletişimdeki spektrum yetersizliğinin olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla geliştirilen ve lisanslı spektrumun daha etkin kullanımını sağlamak için öngörülen temel bir teknolojidir (Haykin 2005, Mitola and Maguire 1999, Zhao and Sadler 2007). BR ağları, lisanslı kullanıcılara (Birincil Kullanıcı, BK) müdahale etmeden lisanslı spektrumun geçici olarak lisanssız kullanıcılar (İkincil Kullanıcı, İK) tarafından kullanılmasına izin vererek, spektrum verimliliğini büyük ölçüde artırabilmektedir.

2. İlgili Çalışmalar

Son yıllarda BR ağlarında kanal tahsisi konusunda literatürde oldukça fazla sayıda araştırma sunulmuştur (Qiming et al. 2010, Salameh et al. 2017, Salameh et al. 2020, Shruti and Kulshrestha 2022) ve halen bu alandaki çalışmalar artarak devam etmektedir.

Qing vd. (2011), farklı bant genişliği kullanan BK'lar ve İK'larla bir BR ağ sistemini analiz etmiş ve İK servislerinin zorla sonlandırılmasını önlemek amacıyla İK'lar için sonlu arabellek kullanımı da içeren dinamik bir spektrum erişim tekniği önermişlerdir. Önerdikleri çalışmada kullanılan ana başarımların İK zorla sonlandırma olasılığı, İK çağrı engelleme olasılığı, İK kullanıcı çağrı düşme olasılığı ve İK gecikmesidir. Bu çalışma ile, arabellek kullanımı ile artan gecikmelere karşın İK servislerinin zorla sonlandırılması işleminin ortadan kaldırıldığı sayısal sonuçlarla gösterilmiştir.

Lee vd. (2012), kanal rezervasyonu nedeniyle azalan çağrı başarımlarını telafi etmek amacıyla düşük öncelikli İK çağrıları için arabellek kullanan bir spektrum kanal tahsis yaklaşımı önermişlerdir. Kanal rezervasyonunun ve arabelleğe alınmanın İK çağrıların başarımlarındaki etkisini karakterize etmek için bir analitik model geliştirmişlerdir. Bu modele dayanarak, değişken arabellek boyutları için hem yüksek hem de düşük öncelikli İK çağrıları için çağrı engelleme olasılığını, zorunlu

çağrı sonlandırma olasılığını ve spektrum verimini değerlendirmişler ve İK çağrıların ara belleğe alınmasının, bu kullanıcıların çağrı engelleme olasılığını önemli ölçüde azaltabildiğini göstermişlerdir.

Telex vd. (2013), İK'ların sabit sayıda birincil kanalı bir araya getirebileceği bir çoklu kanallı BR ağ modelinin başarımlarını incelemişlerdir. İncelenen modelde spektrum algılamadaki yanlış alarmlar (false alarm) ve sezme kaçırmaların (miss detection) etkileri dikkate alınmakta ve ikincil ağda spektrum el değiştirmesinin etkin olduğu varsayılmaktadır. Engellenen İK isteklerini ve kesintiye uğramış İK hizmetlerini kaydetmek için bir arabellek mekanizması sunmuşlardır. Sürekli Zamanlı Markov Zinciri (CTMC) temelli bir analitik model geliştirmişler ve sistem başarımlarını, verimlilik, çağrı engelleme olasılığı ve çağrı zorla sonlandırma olasılığı açısından değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, arabellek kullanımının İK çağrı engelleme olasılığını önemli ölçüde azaltabildiğini ve verimliliği artırabildiğini göstermişlerdir.

Wang vd. (2013), heterojen veri trafiği ve sınırlı sistem kaynaklarını (ikincil baz istasyonundaki önbellek yeteneğini) aynı anda dikkate alarak, BR ağlarında elde edilebilir trafik yükünü artırmak için yeni bir spektrum paylaşım tekniği önermişlerdir. Özellikle, ikincil baz istasyonunda veri depolama kontrolü için ağ kodlaması kullanan bir BR ağ modeli ele alınmakta ve heterojen trafik temelli üç farklı veri değişim senaryosu ve beş tür karşılaştırma mekanizması sunmuşlardır. Başarımların ölçütleri olarak, çağrı engelleme olasılığını, zorunlu çağrı sonlandırma olasılığını, verimliliği ve spektrum kullanımını benimsemişler ve elde ettikleri sayısal sonuçlara göre, mevcut yaklaşımlara kıyasla daha yüksek trafik yükü ve spektrum kullanımını gerçekleştirebileceklerini ifade etmişlerdir.

Kulkarni vd. (2017), İK'ların BK paketlerini iki fazlı aktarma kullanarak ilettiği bir BR ağ sistemi önermişlerdir. Önerilen modelde İK'lar, zaman paylaşımını kullanarak iletim aşamasında kendi paketlerini belirli bir olasılıkla iletmektedir. Birincil ve İkincil kullanıcılar sınırlı kapasiteye sahip kuyruklara sahiptirler. Aktarma kuyruğu durum bilgisinden yararlanan İK'lar, BK'ların paket kaybı olasılığını belirli bir eşik altında tutarken paket dağıtım verimini en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, önerilen ağ modelinin başarımlarını karşılaştırmak ve kuyruk boyutlarının paket dağıtım verimi üzerindeki etkisini incelemek için sayısal sonuçlar sunulmaktadır. Goel vd. (2022), gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan İK'ların mevcut kanalları için BK'larla yarıştığı ve iki tür arabellek kullandığı BR ağlarında yeni bir spektrum yönetim tekniği önermektedir. İK'lar için hizmet

kalitesini (QoS) artırmak amacıyla, yeniden deneme tekniğiyle birlikte spektrum el-değiştirme ve çağrı arabelleğe alma teknikleri birlikte kullanılarak engellenecek veya zorla düşürülecek İK'lar kuyruğa alınarak daha sonra hizmet alabilmeleri sağlanmaktadır. Tüm sistem çok boyutlu sürekli zamanlı Markov zinciri (CTMC) kullanılarak modellenmiş ve servis kalitesi desteği

için başarımların elde edilmiştir. Önerilen yeniden deneme tekniği ve arabellek kullanımı ile verimi arttırırken çağrı engelleme ve çağrı düşme olasılıklarını azalttıklarını sayısal sonuçlar ile sunmuşlardır. Çizelge 1'de BR ağlarında dinamik spektrum erişimini kullanan ilgili literatürün özeti, kanal tahsisinde kullanılan özellikler ve kullanılan başarımların metrikleri açısından özetlenmiştir.

Çizelge 1. BR ağlarında dinamik spektrum erişimini kullanan ilgili literatürün özeti

Referans	Arabellek kullanımı	İK önceliği	Heterojen veri trafiği	Kanal rezervasyonu	Spektrum el-değiştirme	Kanal birleştirme	Başarımların metrikleri
Qiming vd. (2010)	x	x	x	✓	✓	x	İK çağrı engelleme olasılığı, İK spektrum el-değiştirme olasılığı, İK çağrı düşme olasılığı
Qing vd. (2011)	✓	x	x	x	✓	x	İK çağrı engelleme olasılığı, İK zorla çağrı sonlandırma olasılığı, İK ortalama gecikme
Lee vd. (2012)	✓	✓	x	x	✓	x	İK çağrı engelleme olasılığı, İK zorla çağrı sonlandırma olasılığı, İK iş çıkarma oranı
Telex vd. (2013)	✓	x	x	x	✓	✓	İK çağrı engelleme olasılığı, İK zorla çağrı sonlandırma olasılığı, İK iş çıkarma oranı
Wang vd. (2013)	✓	✓	✓	x	✓	x	İK çağrı engelleme olasılığı, İK zorla çağrı sonlandırma olasılığı, İK Kanal kullanım oranı, İK iş çıkarma oranı
Kulkarni vd. (2017)	✓	x	x	x	x	x	İK paket kayıp olasılığı, İK paket iş çıkarma oranı,
Goel vd. (2022)	✓	✓	✓	x	✓	x	İK çağrı engelleme olasılığı, İK zorla çağrı düşme olasılığı, İK iş çıkarma oranı, İK Kanal kullanım oranı,

Bu makalede sunulan çalışma, BK ve İK olmak üzere iki farklı kullanıcı sınıfı içeren merkezi yapıda bir BR ağ modelini esas almaktadır. Önerilen modelde, engellenen veya düşen İK çağrılarını yönetmek ve böylece kablosuz iletişimde verimliliği artırmak ve ağdaki İK çağrı başarımını iyileştirmek amacıyla arabellek kullanımı benimsenmiştir.

Önerilen BR ağ modelinin başarımını değerlendirmek ve analiz etmek amacıyla 3-boyutlu sürekli Markov zinciri modeli geliştirilmiştir. Bununla birlikte, önerilen modelinin bilgisayar benzetimi de gerçekleştirilerek analitik modelden elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. Önerilen ağ modelinin karşılaştırmalı başarımların değerlendirilmesi, Qiming et al. (2010)' in çalışmalarında sunulan ve arabellek içermeyen rassal kanal tahsis algoritması kullanan eşlenik ağ modeli ile gerçekleştirilmiştir. İK çağrı engelleme olasılığı, İK çağrı düşme olasılığı ve İK spektrum el-değiştirme olasılıkları başarımların metrikleri olarak belirlenmiştir. Karşılaştırmalı başarımların değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlara göre, önerilen ağ modeli ile, arabellek kullanmayan modele göre (Qiming et al. 2010), İK çağrı engelleme olasılıklarında, İK çağrı düşme olasılıklarında ve İK

spektrum el-değiştirme olasılıklarında dikkate değer iyileştirmeler elde edilmiştir.

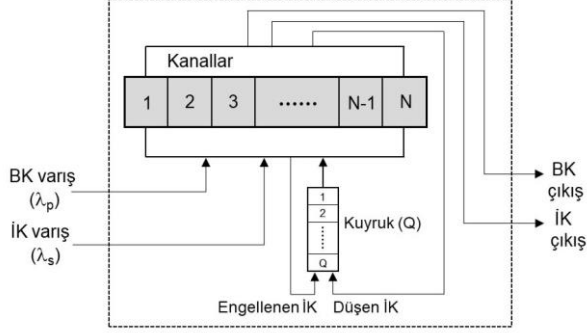
3. Önerilen Bilişsel Radyo Ağ Modeli

Önerilen BR ağ modelinde birincil ve ikincil kullanıcılar, belirli bir coğrafi alanda aynı frekans kanallarını paylaşmaktadırlar. Hem birincil hem de ikincil kullanıcılar için tek bir erişim noktası kullanılmaktadır. Birincil ve ikincil kullanıcıların çağrı varış süreçleri, birbirinden bağımsız Poisson süreçleridir ve bu kullanıcılara ait varış hızları sırasıyla λ_p ve λ_s 'dir. Birincil ve ikincil kullanıcıların servis hızları ise sırasıyla μ_p ve μ_s parametreleri ile üstel dağılıma sahiptir.

3.1 Önerilen ağ modelinde kullanılan kanal ve arabellek yapısı

Şekil 1'de önerilen BR ağ modelinde kullanılan kanal ve arabellek yapısı görülmektedir. Önerilen ağ modelinde toplam N frekans kanalı ve Q boyutlu bir ilk giren ilk çıkar (First-In First-Out, FIFO) kuyruğu arabellek olarak bulunmaktadır. Birincil kullanıcılar, lisanslı kullanıcılar ve kanallara yasal erişim hakkına sahiptirler. İkincil

kullanıcılar ise birincil kullanıcılar tarafından kullanılmayan kanalları bu kullanıcılara zarar vermeden fırsatçı bir yaklaşımla kullanılmaktadırlar. Yeni kanal isteğinde bulunan birincil ve ikincil kullanıcılar için sistemde uygun olan kanallardan sadece bir tanesi tahsis edilir. Sistemde bulunan arabellek ise hem çağrıları engellenen İK'ları, hem de sistemden düşen İK'ları saklamak için kullanılır.



Şekil 1. Önerilen BR ağ modelinde kanal ve arabellek yapısı

3.2 Önerilen ağ modelinde kullanılan kanal tahsis algoritması

Önerilen ağ modelinde birincil ve ikincil kullanıcı arasında anlaşmalı olarak tek bir erişim noktası kullanımı kabul edilmiştir. Bu erişim noktası, ağa bağlanan birincil ve ikincil kullanıcılar için bir Kanal Tahsis Tablosu (KTT) oluşturarak bu tablo yardımıyla kullanıcı türüne (önceliklerine) göre kanal tahsisi gerçekleştirmektedir. Erişim noktası tarafından kullanılan kanal tahsis algoritmasının akış şeması Şekil 2'de verilmiştir. Kanal tahsis işleminde esas teşkil eden dört önemli olay bulunmaktadır:

(1) BK kanal isteği: Sisteme istekte bulunan bir BK için, diğer BK'lar tarafından kullanılmayan (boşta veya İK'lar tarafından kullanılan) bir veya daha fazla kanal varsa, bu kanallardan biri rassal olarak atanır. Eğer diğer BK'lar tarafından kullanılmayan kanal yoksa, istekte bulunan BK için çağrı engelleme durumu oluşur. Eğer BK için atanan kanal mevcut durumda sistemdeki bir İK tarafından kullanılıyorsa, bu kanalı kullanan İK için boş kanal aranır. Eğer boşta kanal varsa, İK o kanala atanır (spektrum el-değiştirme), yoksa İK için çağrı düşme durumu oluşur.

(2) BK servis tamamlama: Sistemdeki bir BK servisini tamamladığında, bu kullanıcıya ait kanal boşta

çıkarılarak, diğer kullanıcıların hizmetine sunulur ve KTT güncellenir.

(3) İK kanal isteği: Sisteme istekte bulunan bir İK için, öncelikle boş olan (diğer birincil ve ikincil kullanıcılar kullanılmayan) kanal aranır. Eğer boşta bir veya daha fazla kanal varsa, bu kanallardan biri rassal olarak istekte bulunan İK için atanır. Eğer sistemde boşta kanal yoksa, ancak arabellekte boşluk varsa bu kullanıcı arabelleğe alınır. Eğer arabellekte de boşluk yoksa, bu kullanıcı için çağrı engelleme durumu oluşur.

(4) İK servis tamamlama: Sistemdeki bir İK servisini tamamladığında, bu kullanıcıya ait kanal boşta çıkarılarak, diğer kullanıcıların hizmetine sunulur ve KTT güncellenir.

4. Önerilen Bilişsel Radyo Ağ Modelinin Başarım Analizi

Önerilen BR ağ modelinin başarım analizi üç boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılarak analitik olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de önerilen ağ modelinin 4 kanal ve 3 arabellek boyutu için Markov zinciri modeli görülmektedir. Markov zinciri modelinde her bir durum (i, j, k) üçlülerinden oluşmaktadır. Burada, i, j, k sırasıyla sistemdeki birincil kullanıcı sayısı, ikincil kullanıcı sayısı ve arabellekte boş kanal bekleyen ikincil kullanıcı sayısını göstermektedir. Markov zincirine ait durum uzayı S , aşağıda verilen Denklem (1) ile tanımlanır;

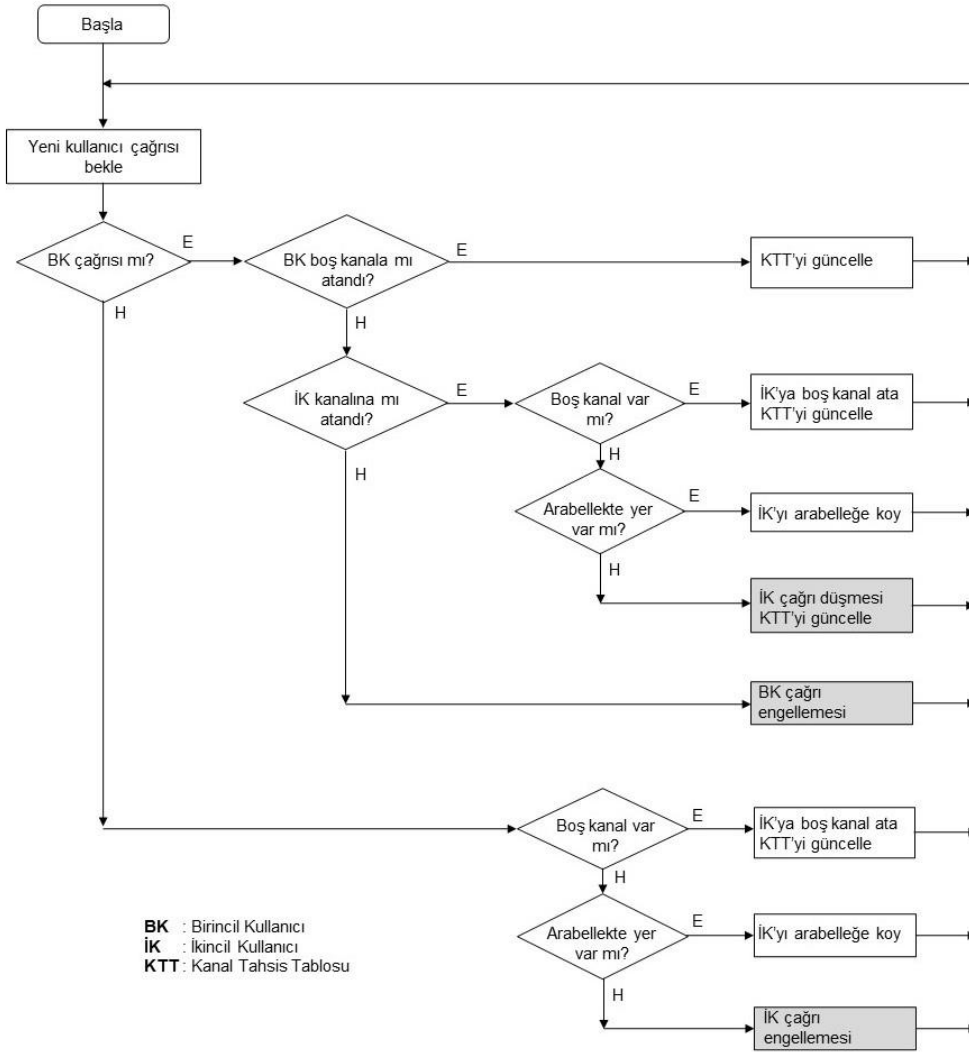
$$S = \{(i, j, k) | 0 \leq i, j \leq N, i + j \leq N, 0 \leq k \leq Q\} \quad (1)$$

Önerilen ağ modelinin Markov zinciri modelinde $i = 0, j = 0, k = 0$; $i = N, j = 0, k = 0$; ve $i = 0, j = N, k = 0$ durumlarına ait denge eşitlikleri sırasıyla Denklem (2), Denklem (3) ve Denklem (4)'te verilmiştir.

$$P(0,0,0)(\lambda_p + \lambda_s) = P(1,0,0)\mu_p + P(0,1,0)\mu_s \quad (2)$$

$$P(N,0,0)(N\mu_p + \lambda_s) = P(N-1,0,0)\lambda_p \quad (3)$$

$$\begin{aligned} P(0,N,0)(\lambda_p + \lambda_s + N\mu_s) \\ = P(0,N-1,0)\lambda_s \\ + P(1,N-1,1)\mu_p \\ + P(0,N,1)N\mu_s \end{aligned} \quad (4)$$



Şekil 2. Önerilen ağ modelinde kullanılan kanal tahsis algoritmasının akış diyagramı

Markov zinciri modelinde $i = 0, j = N, k = Q$; ve $i = N, j = 0, k = Q$ durumlarına denge eşitlikleri sırasıyla Denklem (5) ve Denklem (6)'da verilmiştir.

$$P(0, N, Q)(\lambda_p + N\mu_s) = P(0, N, Q - 1)\lambda_s \quad (5)$$

$$P(N, 0, Q)(N\mu_p) = P(N - 1, 1, Q)\lambda_p + P(N - 1, 1, Q - 1)\lambda_p + P(N, 0, Q - 1)\lambda_s \quad (6)$$

$1 \leq i < N, j = 0, k = 0$ durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (7)'de verilmiştir.

$$P(i, 0, 0)(\lambda_p + \lambda_s + i\mu_p) = P(i - 1, 0, 0)\lambda_p + P(i, 1, 0)\mu_s + P(i + 1, 0, 0)(i + 1)\mu_p \quad (7)$$

$i = 0, 1 \leq j < N, k = 0$ durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (8)'de verilmiştir.

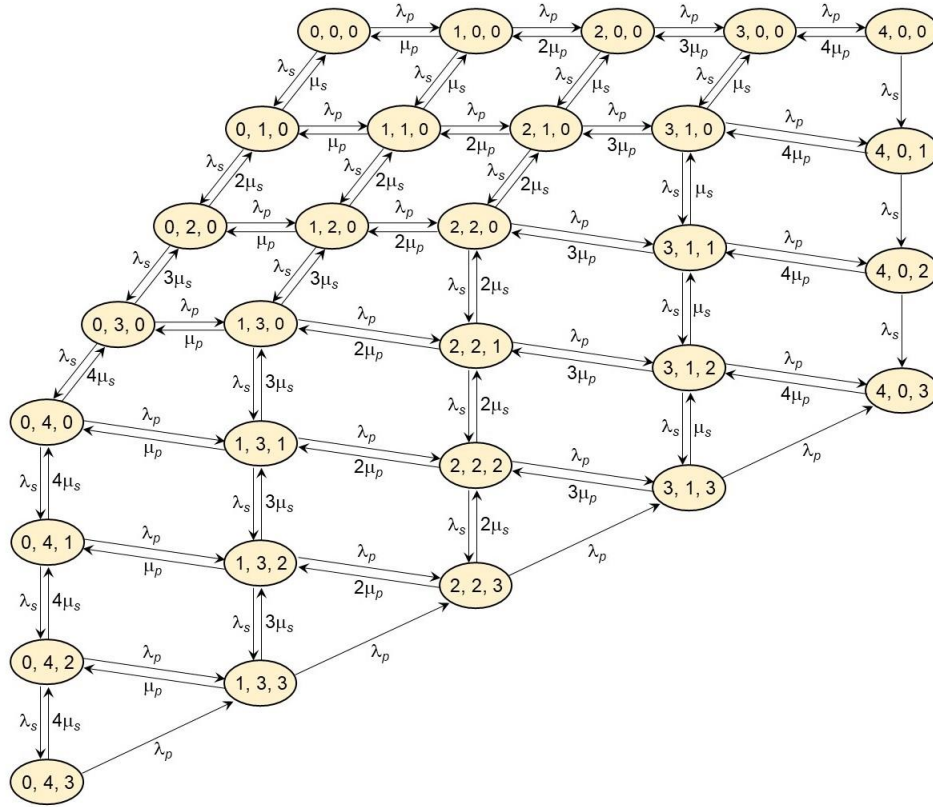
$$P(0, j, 0)(\lambda_p + \lambda_s + j\mu_s) = P(0, j - 1, 0)\lambda_s + P(1, j, 0)\mu_p + P(0, j + 1, 0)(j + 1)\mu_s \quad (8)$$

$i = 0, j = N, 1 \leq k < Q$ durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (9)'da verilmiştir.

$$P(0, N, k)(\lambda_p + \lambda_s + N\mu_s) = P(0, N, k - 1)\lambda_s + P(0, N, k + 1)N\mu_s + P(1, N - 1, k + 1)\mu_p \quad (9)$$

$i = N, j = 0, 1 \leq k < Q$ durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (10)'da verilmiştir.

$$P(N, 0, k)(\lambda_s + N\mu_p) = P(N, 0, k - 1)\lambda_s + P(N - 1, 1, k - 1)\lambda_p \quad (10)$$



Şekil 3. Önerilen ağ modelinin 4 kanal ve 3 arabellek boyutu için sürekli Markov zinciri modeli

$1 \leq i < N, i + j = N, k = 0$ durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (11)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P(i, j, 0)(\lambda_p + \lambda_s + i\mu_p + j\mu_s) &= P(i - 1, j, 0)\lambda_p \\
 &+ P(i, j - 1, 0)\lambda_s \\
 &+ P(i + 1, j - 1, 1)(i + 1)\mu_p \\
 &+ P(i, j, 1)j\mu_s
 \end{aligned} \tag{11}$$

$1 \leq i < N, i + j = N, k = Q$ durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (12)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P(i, j, k)(\lambda_p + i\mu_p + j\mu_s) &= P(i, j, Q - 1)\lambda_s \\
 &+ P(i - 1, j + 1, Q - 1)\lambda_p \\
 &+ P(i - 1, j + 1, Q)\lambda_p
 \end{aligned} \tag{12}$$

$1 \leq i < N, i + j = N, 1 \leq k < Q$ durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (13)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P(i, j, k)(\lambda_p + \lambda_s + i\mu_p + j\mu_s) &= P(i - 1, j + 1, k - 1)\lambda_p \\
 &+ P(i, j, k - 1)\lambda_s \\
 &+ P(i + 1, j - 1, k + 1)(i + 1)\mu_p \\
 &+ P(i, j, k + 1)j\mu_s
 \end{aligned} \tag{13}$$

$1 \leq i < N, 1 \leq j < N, i + j < N, k = 0$ durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (14)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P(i, j, k)(\lambda_p + \lambda_s + i\mu_p + j\mu_s) &= P(i - 1, j, k)\lambda_p \\
 &+ P(i, j - 1, k)\lambda_s \\
 &+ P(i + 1, j, k)(i + 1)\mu_p \\
 &+ P(i, j + 1, k)(j + 1)\mu_s
 \end{aligned} \tag{14}$$

Markov zinciri modelinde tüm durumların olasılıkları toplamı 1 olduğundan bu durum Denklem (15) ile gösterilebilir;

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^Q P(i, j, k) = 1 \tag{15}$$

İkincil kullanıcılara ait çağrı engelleme olasılığı Markov zinciri modelinde ilgili durumlar kullanılarak Denklem (16) ile hesaplanır;

$$\begin{aligned}
 P_B &= \frac{\text{Engellenen IK çağrı sayısı}}{\text{Toplam IK çağrı sayısı}} \\
 &= \sum_{i=0, i+j=N, k=Q}^N P(i, j, k)
 \end{aligned} \tag{16}$$

İkincil kullanıcılara ait çağrı düşme olasılığı (P_D), Markov zinciri modelinde ilgili durumlar kullanılarak Denklem (17) ile hesaplanır.

$$P_D = \frac{\text{Düşen İK çağrı sayısı}}{\text{Toplam İK çağrı sayısı}} \quad (17)$$

$$= \sum_{i=0, i+j=N, k=Q}^{N-1} \frac{P(i, j, k) \lambda_p}{\lambda_s}$$

İkincil kullanıcılara ait çağrı el-değiştirme olasılığı (P_H), Markov zinciri modelinde ilgili durumlar kullanılarak Denklem (18) ile hesaplanır.

$$P_H = \frac{\text{El - değiştiren İK çağrı sayısı}}{\text{Toplam İK çağrı sayısı}} \quad (18)$$

$$= \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0, i+j < N}^{N-1} \frac{(j/(N-i))P(i, j, 0) \lambda_p}{\lambda_s}$$

5. Sayısal Sonuçlar ve Analiz

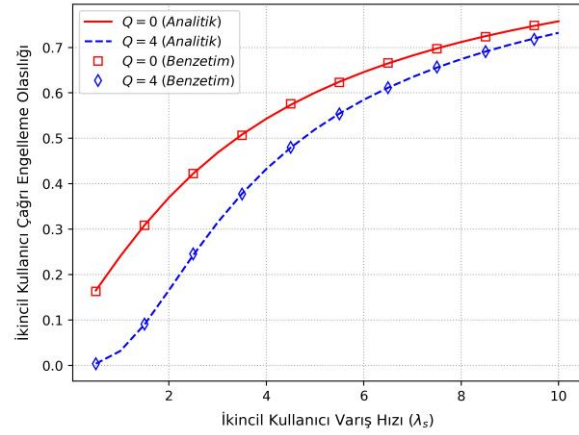
Bu çalışmada önerilen BR ağ modelinden elde edilen analitik ve benzetim sonuçları, artan İK varış hızları için analiz edilmiştir. BR ağında kullanılan başarımler, çağrı engelleme olasılığı, çağrı düşme olasılığı ve spektrum el-değiştirme olasılıkları olarak belirlenmiştir. Sunulan bütün grafiklerde, önerilen ağ modelinden elde edilen sonuçlar, Qiming et al. (2010) tarafından geliştirilen (arabellek kullanmayan) eş ağ modelinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Geliştirilen BR ağ analitik ve benzetim modelinde kullanılan parametreler Çizelge 2’de sunulmuştur. Burada kullanılan parametrelerden ilgili olanlar için Toukhey et al. (2016) ve Telex et al. (2012) makaleleri referans alınmıştır.

Çizelge 2. Önerilen ağ modeli benzetim parametreleri

Kanal sayısı (M)	3
Kuyruk büyüklüğü (Q)	4
PU varış hızı (λ_p)	1,2
SU varış hızı (λ_s)	0 – 10
PU servis hızı (μ_p)	1,0
SU servis hızı (μ_s)	1,0

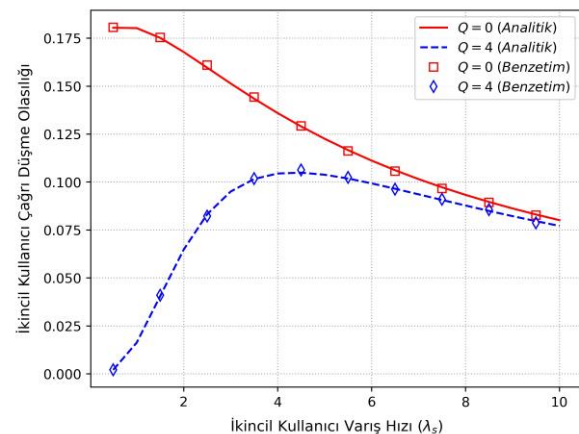
Şekil 4’te artan İK varış hızları için arabellek ($Q = 4$) kullanan önerilen ağ modeli ile Qiming et al. (2010) tarafından geliştirilen ve arabellek kullanmayan ($Q = 0$) eş ağ modelinden elde edilen İK çağrı engelleme olasılıkları sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde sabit bir BK varış hızı (λ_p) için, İK varış hızı (0 – 10) arttırıldığında İK çağrı engelleme olasılıklarının her iki model için de arttığı görülmektedir. Örneğin İK varış hızı 2,0 iken, çağrı engelleme olasılığı ($Q = 0$) olan modelde 0,37, ($Q = 4$) olan modelde 0,17 olurken, İK varış hızı 4’e arttırıldığında, çağrı engelleme olasılığı ($Q = 0$) olan modelde 0,54, ($Q = 4$) olan modelde 0,43 olmaktadır. Bununla birlikte önerilen modelden elde edilen çağrı engelleme olasılıkları İK’ların bütün yük değerleri için daha düşüktür. Örneğin İK

varış hızı 2 olduğunda, önerilen modelden edilen çağrı engelleme olasılığı, arabellek kullanmayan modelden elde edilen çağrı engelleme olasılığından yaklaşık %55 daha iyi sonuç vermektedir.



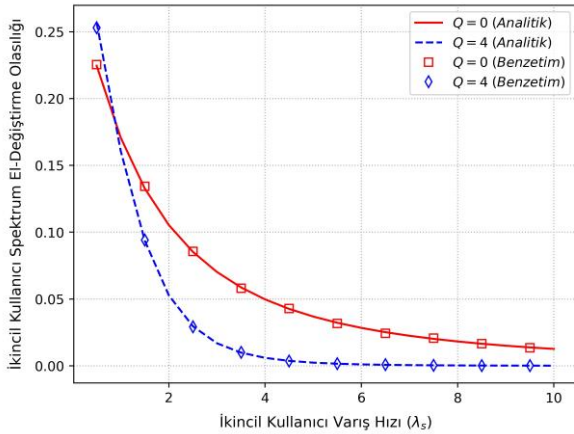
Şekil 4. Artan İK varış hızları için İK çağrı engellenme olasılıkları

Şekil 5’de artan İK varış hızları için arabellek kullanan önerilen ağ modeli ile arabellek kullanmayan eş ağ modelinden elde edilen İK çağrı düşme olasılıkları verilmiştir. Grafikler incelendiğinde sabit bir BK varış hızı (λ_p) için, İK varış hızı (0 – 10) arttırıldığında İK çağrı düşme olasılıklarının arabellek kullanmayan modelde sürekli azalırken, arabellek kullanan modelde belirli bir değere ($\lambda_s = 4$) kadar arttığı, bu değerden sonra ise azaldığı görülmektedir. Arabellek kullanmayan ağ modelinde artan İK varış hızları için İK çağrı düşme olasılıklarının azalma sebebi, İK çağrı engelleme oranlarının artmasıdır. Bu modelde artan İK varış hızları için İK’lara gerekli spektrum tahsisi yapılamayacağından, sistemdeki İK sayısı azalacak ve buna bağlı olarak bu kullanıcıların çağrı düşme olasılıkları da düşecektir. Bununla birlikte önerilen ağ modelinden elde edilen İK çağrı düşme olasılıkları İK’ların bütün varış hızları için arabellek kullanmayan modelden daha iyi (düşük) sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 5. Artan İK varış hızları için İK çağrı düşme olasılıkları

Şekil 6'da artan İK varış hızları için önerilen ağ modelinden ve Qiming et al. (2010) tarafından geliştirilen eş ağ modelinden elde edilen İK spektrum el-değiştirme olasılıkları sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde sabit bir BK varış hızı (λ_p) için, İK varış hızı (0 – 10) arttırıldığında İK spektrum el-değiştirme olasılıklarının her iki model için de azaldığı görülmektedir. Örneğin İK varış hızı 2,0 iken, spektrum el-değiştirme olasılığı önerilen modelde ($Q = 4$) 0,053, arabelleksiz ($Q = 0$) olan modelde 0,10 olurken, İK varış hızı 4'e arttırıldığında, önerilen modelde ($Q = 4$) 0,006, ($Q = 0$) olan modelde 0,05 olmaktadır. Bununla birlikte önerilen modelden elde edilen spektrum el-değiştirme olasılıkları, İK'ların varış hızları 1,0 olana kadar arabelleksiz eş modelden elde edilen değerlerden daha yüksek, bu değerden sonraki bütün varış hızları için daha düşüktür. Örneğin İK varış hızı 2 iken, önerilen modelden edilen spektrum el-değiştirme olasılığı 0,052, arabellek kullanmayan modelden elde edilen spektrum el-değiştirme olasılığı ise 0,105'dir. Bu varış hızında önerilen model yaklaşık 2,01 kat daha iyi sonuç vermektedir.



Şekil 6. Artan İK varış hızları için İK spektrum el-değiştirme olasılıkları

6. Sonuç

Bu makalede, İK'ların lisanslı spektrumu fırsatçı bir yaklaşımla kullandığı ve engellenen ya da yeni gelen BK çağrılarında dolayı bağlantısı düşen İK'lar için arabellek kullanımı öngören bir BR ağ modeli sunulmaktadır. Önerilen BR ağ modelinin başarımı hem üç boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılarak analitik olarak hem de bilgisayar benzetimiyle elde edilmiştir. Ayrıca, benzetim modelinden elde edilen sonuçlarla, analitik modelden elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. İK çağrı engelleme olasılığı, İK çağrı düşme olasılığı ve İK spektrum el-değiştirme olasılığı başarımleri olarak benimsenmiştir. Önerilen modelden elde edilen sonuçlar, literatürdeki arabellek kullanmayan eş bir modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Önerilen model, özellikle İK yükünün (İK varış hızı) düşük

olduğu (0-5) senaryolarda, İK çağrı engelleme olasılığı ve çağrı düşme olasılıklarında yüksek iyileştirmeler sağlarken, spektrum el-değiştirme olasılığında düşük iyileşme sağlamıştır. İK yükünün yüksek olduğu (5'ten büyük) senaryolarda ise, İK çağrı engelleme olasılığı ve çağrı düşme olasılıklarında düşük iyileştirmeler sağlarken, spektrum el-değiştirme olasılığında yüksek iyileşme sağlamıştır. Örneğin, İK varış hızı 2 olduğunda, İK çağrı engelleme olasılığında %55,2, İK çağrı düşme olasılığında %61,4 ve İK spektrum el-değiştirme olasılığında yaklaşık %49,9 oranında iyileşme elde edilmiştir. İK varış hızı 6 olduğunda ise, İK çağrı engelleme olasılığında %9,4, İK çağrı düşme olasılığında %10,7 ve İK spektrum el-değiştirme olasılığında %96,3 oranında iyileşme elde edilmiştir.

Bu çalışmadan farklı olarak İK'ların kullandıkları veri trafik türlerine göre farklı önceliklere sahip olduğu bir BR ağının modellenmesi, benzetimi ve analizi gelecek çalışma olarak düşünülmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Makalenin tamamı başlıca yazar tarafından yazılmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarın bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edeceği hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

7. Kaynaklar

- Bayrakdar, M. E., and Çalhan, A., 2015. Bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme. *Sakarya University Journal of Science*, **19(3)**, 291-302. <https://doi.org/10.16984/SAUFENBILDER.81445>
- Goel, S., Kulshrestha, R., 2022. Queueing based spectrum management in cognitive radio networks with retrial and heterogeneous service classes. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, **13**, 2429–2437. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03442-z>
- Hassani, M. M., and Berangi, R., 2019. Impact of the primary user on the secondary user blocking probability in cognitive radio sensor networks. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, **27(3)**, 2081-2092. <https://doi.org/10.3906/elk-1706-292>
- Haykin, S., 2005. Cognitive radio: brain–empowered wireless communications. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, **23(2)**, 201–220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>

- Kulkarni, K., and Adrish, B., 2017. On Optimal Spectrum Access of Cognitive Relay with Finite Packet Buffer. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **66**, 7584-7588.
- Lee, Y., Park, G. C., Sim, D.B., 2012. Cognitive radio spectrum access with prioritized secondary users, *Applied Mathematics & Information Sciences*, **6(2)**, 595-601.
- Mitola, J., and Maguire, G. Q., 1999. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, **6(4)**, 13-18.
<https://doi.org/10.1109/98.788210>
- Qiming, T., Chuan, M., Guanding, Y., and Aiping, H., 2010. Analysis of cognitive radio spectrum access with finite primary users and infinite secondary users. *International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, China, pp. 1-5.
<https://doi.org/10.1109/WCSP.2010.5633740>
- Qing, H., Shaoyi, X., and Xiaojun J., 2011. Performance evaluation of secondary users in Dynamic Spectrum Access system, 2011. *IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Toronto, Canada, pp. 710-714.
<https://www.doi.org/10.1109/PIMRC.2011.6140057>
- Salameh, O., Bruneel, H., and Wittevrongel, S., 2020. Performance evaluation of cognitive radio networks with imperfect spectrum sensing and bursty primary user traffic. *Mathematical Problems in Engineering*, **64**, 1-11.
<https://doi.org/10.1155/2020/4102046>
- Salameh, O., Turck, K. D., and Bruneel, H., 2017. Analysis of secondary user performance in cognitive radio networks with reactive spectrum handoff. *Telecommunication Systems*, **65**, 539-550.
<https://doi.org/10.1007/s11235-016-0250-7>
- Shruti and Kulshrestha, R., 2022. Analysis of Spectrum Sensing and Spectrum Access in Cognitive Radio Networks with Heterogeneous Traffic and p -Retry Buffering, in *IEEE Transactions on Mobile Computing*. **21(7)**, pp. 2318-2331.
<https://www.doi.org/10.1109/TMC.2020.3042836>
- Tang, W., Yu, H., Han, Y., and Li, S., 2012. An analytical performance model considering access strategy of opportunistic spectrum sharing system. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, **24(11)**, 1200-1212.
<https://doi.org/10.1002/cpe.1890>
- Telex, M. N. N., Shou. Dong and Atta S. Attahiru, Analysis of cognitive radio networks with channel assembling, buffering, and imperfect sensing, 2013. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Shanghai, China, pp. 952-957.
<https://www.doi.org/10.1109/WCNC.2013.6554692>
- Toukhey, A.T.E, Mohsen M. T., and Ibrahim F. T, 2016. QoS-Driven Channel Allocation Schemes Based on Secondary Users' Priority in Cognitive Radio Networks. *International Journal of Wireless and Mobile Computing* **11(2)**, 91-99.
- Wang, Z., and Zhang, Y., Analysis of cognitive radio spectrum access with heterogeneous traffic under buffer constraints, 2013. *3rd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, Xianning, China, pp. 137-140.
<https://www.doi.org/10.1109/CECNet.2013.6703291>
- Zhao, Q., and Sadler, B. M., 2007. A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Processing Magazine*, **24(3)**, 79-89.
<https://doi.org/10.1109/MSP.2007.361604>