

Bilişsel Radyo Ağlarında Çevrimiçi Öğrenme Tabanlı İşbirlikçi Spektrum Algılama Algoritmasının Sönümlü Kanallardaki Başarımı

Kenan KOÇKAYA^{1*}, İbrahim DEVELİ²

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Divriği Nuri Demirağ High School, Sivas-TURKEY

²Erciyes Üniversitesi Engineering Faculty, Kayseri-TURKEY

*Corresponding author: kkockaya@cumhuriyet.edu.tr

*Speaker: kkockaya@cumhuriyet.edu.tr

Presentation/Paper Type: Oral / Full Paper

ÖZET– Spektrum algılamada amaç spektrum boşluklarının doğru ve hızlı bir şekilde algılanmasıdır. Bu nedenle bilişsel radyo ağlarının başarımı büyük ölçüde spektrum algılama işlevine bağlıdır. Bu çalışmada, bilişsel radyo ağlarında spektrum algılama başarımını artırmak için çevrimiçi öğrenme tabanlı işbirlikçi spektrum algılama algoritması önerilmiştir. Önerilen yöntemin işbirlikçi spektrum algılama başarım analizi sönümsüz AWGN kanala ilaveten Rayleigh, Nakagami-*m* ve Rician sönümlü kanallarında yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları sonucunda, bilişsel radyo ağlarında geçmiş verilerden eşik değeri ifadesinin optimize edilmesi ve işbirlikçi algılama yaklaşımı ile daha etkin bir algılama yapılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Spektrum algılama, Enerji Tabanlı Algılama, İşbirlikçi Spektrum Algılama, Makine Öğrenme Algoritmaları, Çevrimiçi Öğrenme Algoritması.

I. GİRİŞ

Kablosuz haberleşme sistemleri hayatın her alanında kullanıcıların ihtiyaçlarına cevap verebilmek için hızla değişmekte ve gelişmektedir. Esnek yapısı ve yüksek hızlı veri iletimi nedeniyle kablosuz iletim sistemlerini kullanan kullanıcı sayısı her geçen gün artmaktadır. Uygulama çeşitliliği ve kullanıcı sayısındaki artış kit bir kaynak olan spektrumun verimli bir şekilde kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Federal İletişim Komisyonu (FCC) tarafından yapılan çalışmalarda mevcut spektrum bandlarının büyük bir kısmının lisanslı kullanıcılar (PU) tarafından zaman, frekans ve coğrafi konumlarda etkin bir şekilde kullanılmadığını göstermiştir [1]. Kullanılmayan ya da az kullanılan spektrum boşluklarının lisanslı kullanıcılar tarafından kullanılmadığı durumlarda ikincil kullanıcılar (SU) tarafından verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için bilişsel radyo (CR) kavramı tanımlanmıştır [2]. Bilişsel radyo kullanıcılar arasında herhangi bir olumsuzluğa neden olmadan spektrum paylaşımını gerçekleştiren yazılım tabanlı bir teknolojidir [3]. Bilişsel radyo ağlarında spektrum kullanım önceliğinin PU'lara ait olması nedeni ile SU'lar tarafından spektrum boşluklarının hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesi iletişim kalitesi ve sürdürülebilirliği açısından önemlidir. Bilişsel radyo ağlarında spektrum algılama performansı, gizli terminal problemleri, gölgeleme, gürültü belirsizliği, çok yönlü sönümlenme ve kanalda zamanla meydana gelen değişimler nedeniyle oldukça düşmektedir [4].

Spektrum algılama probleminde karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek ve algılama başarımını artırmak amacıyla işbirlikçi spektrum algılama (CSS) modeli önerilmiştir [5]-[8]. CSS modeli iki aşamalı bir yapıya sahiptir. İlk aşamada yerel SU'lar tarafından spektrum algılama işlevi gerçekleştirilir. İkinci aşamada ise her SU, elde ettiği verileri bir karar verme merkezine rapor eder. Bu karar verme merkezinde toplanan spektrum algılama raporları, bir füzyon kuralına göre birleştirilir ve PU'nun varlığına ilişkin nihai karar verilir [9]-

[12]. Literatür incelendiğinde spektrum algılama teknikleri içerisinde en popüler yöntem, PU'lar hakkında önsel bilgiye gereksinim duymaması ve matematiksel karmaşıklığının az olması nedeniyle enerji tabanlı algılama yöntemidir [13]-[15]. Enerji tabanlı algılamada PU'nun varlığına ya da yokluğuna karar vermek için belirli bir frekans bandı için hesaplanan test istatistik değeri ile gürültüye bağımlı olarak elde edilen eşik değeri ifadesi karşılaştırılır. Uygun eşik değeri seçimi ile algılama performansında artış ve algılama süresinde iyileşme sağlanabilir [16]-[18]. [16]'da, yerel eşik değeri ifadesi yanlış alarm olasılığına bağlı olarak hesaplanmıştır. PU'nun varlığına karar vermek için bir otokorelasyon detektörü kullanılmış ve yerel eşik değeri ifadesi kullanarak füzyon merkezine gönderilen test istatistikleri kısıtlanmıştır. Bunun sonucunda spektrum algılama başarımında artış sağlanmıştır. [17] ve [18]'de enerji tespiti için çift eşik kullanan sistem modelleri önerilmiştir. Çift eşik kullanılması sonucunda algılama başarımı ve süresinde iyileşme sağlanabileceği gösterilmiştir. Son yıllarda makine öğrenme algoritmaları spektrum algılama problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan tekniklerden birisidir. Makine öğrenme yöntemlerinin gelişmiş tahmin, kestirim ve sınıflandırma yetenekleri sayesinde spektrum algılama başarımının geleneksel yöntemlere göre daha iyi olduğu gösterilmiştir [19]-[21]. [19]'da PU'nun varlığına ya da yokluğuna karar vermek için oluşturulan hipotezlere ilişkin birinci ve ikinci tip istatistiksel hatalar analiz edilerek spektrum algılama başarımının artırılabilirliği gösterilmiştir. [20] ve [21]'de bilişsel radyo ağlarında spektrum algılama başarımı, öğretme-öğrenme tabanlı en iyileme yöntemi (TLBO) kullanılarak analiz edilmiştir. Eşik değeri ifadesinin optimize edilmesi sonucunda algılama süresi ve doğruluğunda iyileşme olduğu gösterilmiştir.

Bu çalışmada, çevrimiçi öğrenme algoritması kullanılarak bilişsel radyo ağlarının AWGN ve farklı sönümlü kanallar üzerindeki işbirlikçi spektrum algılama başarımı analiz

edilmiştir. Ayrıca spektrum algılama başarımını artırmak için hatalı alarm ve hatalı algılama olasılıkları toplamda minimize edilmiş ve optimum eşik değer ifadesi yeniden tanımlanmıştır.

II. SİSTEM MODELİ

Spektrum sezmede, birincil kullanıcı işaretinin mevcut olup olmadığını tespit etmek için aşağıdaki gibi iki hipotez oluşturulur.

$$y(n) = \begin{cases} w(n), & H_0, \\ h(n)x(n) + w(n), & H_1, \end{cases} \quad (1)$$

Burada $y(n)$, SU tarafından alınan işareti, $x(n)$ PU tarafından iletilen işareti, $h(n)$ kanalın genlik kazancını, $w(n)$ ise sıfır ortalamalı ve varyansı σ_n^2 olan toplanabilir beyaz Gauss gürültüsünü (AWGN) ve $n = 0, 1, 2, \dots, M_s$ olmak üzere M_s ise gözlemlenen pencere sayısını ifade etmektedir. Enerji algılama yönteminde enerji algılayıcı alınan işaretin belli bir zaman aralığında test istatistiği olarak ifade edilen enerjisini ölçer ve gürültü varyansına bağlı bir eşik seviyesi ile karşılaştırarak birincil kullanıcı işaretinin varlığına karar verir. Enerji algılayıcı için test istatistik ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$M(y) = \sum_{n=1}^{M_s} |y(n)|^2 \quad (2)$$

Test istatistiğine bağlı olarak algılama olasılığı (P_d), yanlış alarm olasılığı (P_f) ifadeleri ise;

$$P_d = P(M(y) > \lambda | H_1) \quad (3)$$

$$P_f = P(M(y) > \lambda | H_0) \quad (4)$$

şeklinde tanımlanır. Burada λ eşik değer ifadesidir. Spektrum algılama performansı P_d ve P_f parametrelerine bağlı olarak ölçülür. Spektrum algılama başarımını artırmak için P_d 'nin olabildiğince büyük, P_f 'nin ise küçük olması istenir. AWGN kanal için algılama olasılığı, yanlış alarm olasılığı ve hatalı algılama olasılığı eşik değer ve işaret gürültü oranı (SNR) bağımlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır [22].

$$P_d = \frac{\Gamma(u, \lambda/2)}{\Gamma(u)} \quad (5)$$

$$P_f = Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (6)$$

$$P_m = 1 - P_d \quad (7)$$

Burada $\Gamma(a, b)$ tamamlanmamış gamma fonksiyonu, $\Gamma(\cdot)$ gamma fonksiyonu, u zaman-band genişliği ürününü, γ sinyal-gürültü oranını (SNR) ve $Q_u(a, b)$ genelleştirilmiş Marcum Q-fonksiyonu göstermektedir.

Spektrum algılama probleminin çözümünde enerji algılama tabanlı yöntemin başarımı optimum eşik değer ifadesinin elde edilmesine bağlıdır. Eşik değer ifadesine bağlı olarak lisanslı kullanıcıların varlığına ya da yokluğuna karar verilir. Uygun bir eşik değer elde edilememesi sistem algılama başarımında istenmeyen düşüşlere neden olacaktır. Kanalın zamanla değişen yapısı gölgeleme, sönümlenme ve gizli terminal problemleri ve gürültü belirsizliği algılama başarımını düşürür. İşbirlikçi algılama düzeni kullanılarak algılama başarımı iyileştirilebilir. Bilişsel kullanıcıların yerel kararları bir füzyon merkezinde birleştirilir ve birincil

kullanıcının varlığı veya yokluğuyla ilgili nihai karar, belirli bir füzyon kuralına göre yapılır. K elemanlı bir işbirlikçi yapı için VE (AND) ve VEYA (OR) kuralına göre P_d ve P_f ifadeleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [23].

$$P_{ve_d} = \prod_{i=1}^K P_{d,i} \quad (8)$$

$$P_{ve_f} = \prod_{i=1}^K P_{f,i} \quad (9)$$

$$P_{veya_d} = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_{d,i}) \quad (10)$$

$$P_{veya_f} = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_{f,i}) \quad (11)$$

III. ÇEVİRİMİÇİ ÖĞRENME ALGORTİMASI İLE EŞİK DEĞER İFADESİNİN OPTİMİZASYONU

Spektrum algılama probleminin çözümünde kullanılan enerji tabanlı algılama yönteminin başarımı gürültü gücüne göre tanımlanan eşik değer ifadesine bağlı olarak değişmektedir. Spektrum algılama işlemindeki yanlış alarm ve hatalı algılama olasılıklarına bağlı olarak elde edilen birinci ve ikinci tip istatistiksel hataların analiz edilmesi sonucunda optimum eşik değer ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanır [19].

$$\lambda = \lambda_i \pm p_i \left[\frac{\min(energy_i) + \max(energy_i)}{2} \right] \quad (12)$$

Burada, p_i iyileştirme faktörüdür.

Bu bölümde, çevrimiçi öğrenme algoritması ile en iyi algılama performansına sahip olan optimum eşik değer ifadesinin elde edildiği bir model sunulmuştur. Online öğrenme algoritmasının dört temel fonksiyonu vardır. Bunlar sırası ile,

- i. Veri toplama ve Ön İşleme: H_0 ve H_1 ikili hipotezlerinde karşılaştırma sonucunda elde edilen toplam hataya ilişkin veriler analiz edilerek popülasyon büyüklüğüne ve tasarım değişkenlerine bağlı popülasyon elde edilir.
- ii. Veri setinde hesaplama: Veri toplama ve ön işleme aşamasında elde edilen verilerden modelde kullanılacak ağırlık ve hata katsayıları elde edilir.
- iii. Öğretme aşaması: Eğitim aşamasında başarı ortalamalarına göre sınıflar oluşturulur. Sınıftaki en iyi çözümü veren öğrenci öğretmen olarak düşünülmektedir. Buna göre diğer öğrenciler aşağıdaki bağıntıya göre öğretmenin bilgisinden istifade ederek güncellenmektedir. Yeni öğrenci eski öğrenciden daha iyi bir çözüm veriyorsa eskisinin yerine geçmektedir.

$$X_{yeni,i} = X_i + r(X_{öğretmen} - T_f * X_{ort}) \quad (13)$$

Burada, T_f bir çarpan olup 1 veya 2 arasında bir değer alır. r ise [0,1] aralığında rastgele bir sayıdır.

- iv. Öğrenme aşaması: Bu aşamada işlemler bir önceki aşamaya oldukça benzerdir. Bu aşamada sınıftaki öğrenciler arasında bir etkileşim olmaktadır. Daha iyi çözüm veren, bilgi düzeyi daha yüksek olan öğrenciden diğer öğrenciye bilgi

aktarımı aşağıdaki denklemler ile sağlanmaktadır. Yeni öğrenci mevcut öğrenciden daha iyi bir iyi bir ağılama çözümü verirse onun yerine geçmekte, aksi durumda yerini korumaktadır.

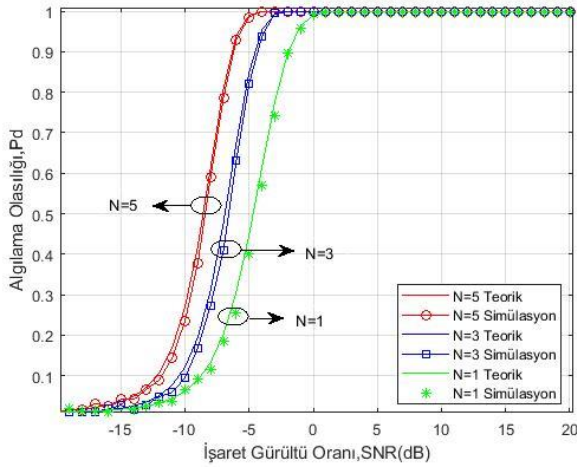
$$X_{Yeni,i} = X_i + r(X_i - X_j), \text{ eğer } f(X_i) < f(X_j) \quad (14)$$

$$X_{Yeni,i} = X_i + r(X_j - X_i), \text{ eğer } f(X_j) < f(X_i) \quad (15)$$

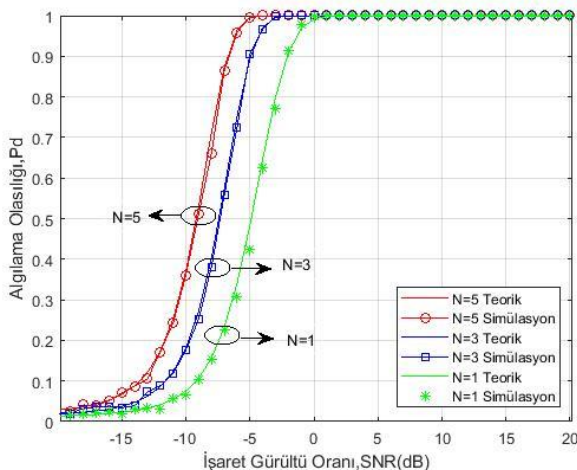
IV. BAŞARIM DEĞERLENDİRMELERİ

Bu bölümde, çevrimiçi öğrenme algoritması yardımıyla bilişsel radyo ağlarında işbirlikli spektrum algılama başarımı analiz edilmiştir. Bilgisayar benzetimleri aracılığıyla elde edilen sonuçlar AWGN ve üç farklı sönümlü kanal modeli için verilmiştir. Ele alınan senaryo için sistem parametreleri şu şekilde seçilmiştir. İterasyon sayısı 50 ve $M_s = 100$ olarak alınmıştır.

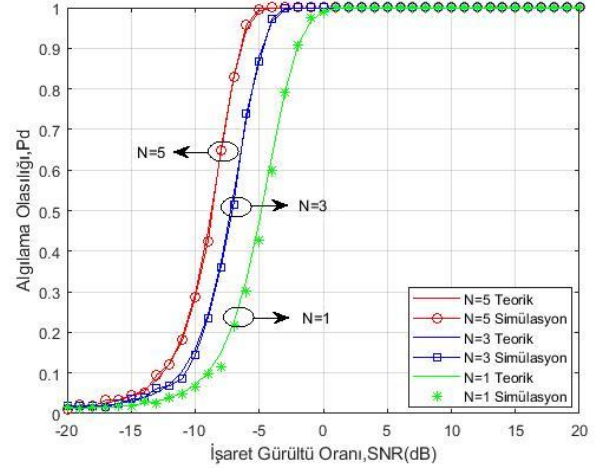
Şekil 1,2,3 ve 4’de çevrimiçi öğrenme algoritmasının farklı sayıda işbirlikçi düğüm ve değişen SNR değerleri için AWGN kanal ve Rayleigh, Nakagami- m , Rician sönümlü kanallar üzerinde algılama olasılığının başarımı araştırılmıştır. Simülasyonlarda birincil kullanıcı işareti ve gürültü işareti rasgele oluşturulmuş ve WRAN 802.22 standartına göre $P_f = 0.1$, Nakagami- m sönümlü kanal için dağılım parametresi $m=3$, Rician dağılım parametresi $K=5$ olarak alınmıştır. Kullanıcı sayısının artması ile algılama performansında artış sağlanırken, çevrimiçi öğrenme algoritmasının başarımının teorik sonuçlarla açık bir şekilde örtüştüğü görülmektedir.



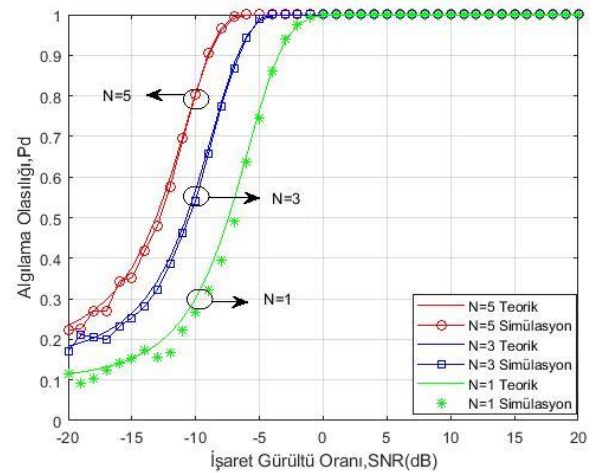
Şekil 1. AWGN Kanal için SNR- P_d Değişim Grafiği



Şekil 2. Rayleigh Kanal için SNR- P_d Değişim Grafiği



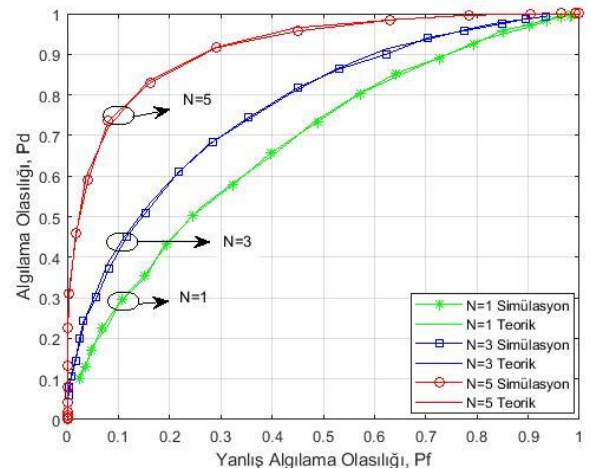
Şekil 3. Nakagami- m Kanal için SNR- P_d Değişim Grafiği ($m=3$)



Şekil 4. Rician Kanal için SNR- P_d Değişim Grafiği ($K=5$)

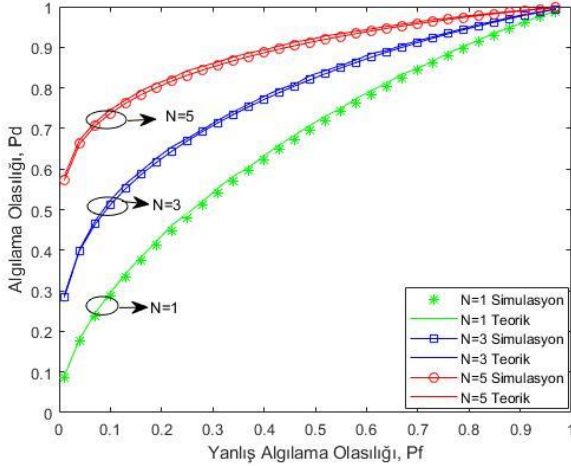
SNR- P_d değişim grafikleri incelendiğinde Rician sönümlü kanalın düşük SNR rejiminde diğer kanallara göre daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Örneğin, SNR=-10dB için Rician kanalın algılama olasılığı N=5 işbirlikçi düğüm için 0.796 iken AWGN, Rayleigh ve Nakagami- m kanalları için sırasıyla 0.236, 0.364, 0.418 olarak bulunmuştur.

Şekil 5, 6, 7 ve 8’de SNR=-10 dB’de alıcı işletim karakteristik eğrisi (ROC), AWGN kanal ve Rayleigh, Nakagami- m , Rician sönümlü kanallar için elde edilmiştir.

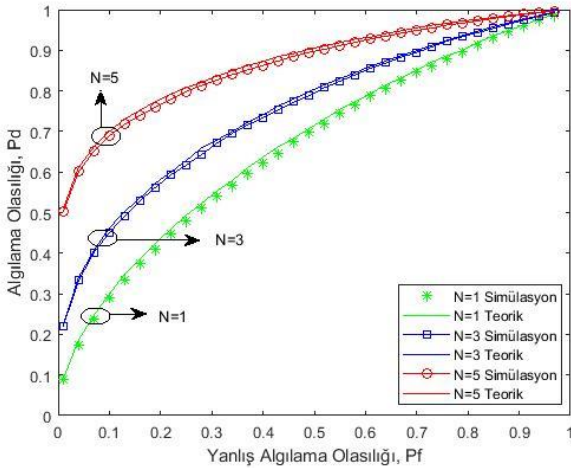


Şekil 5. AWGN Kanal için ROC Eğrisi

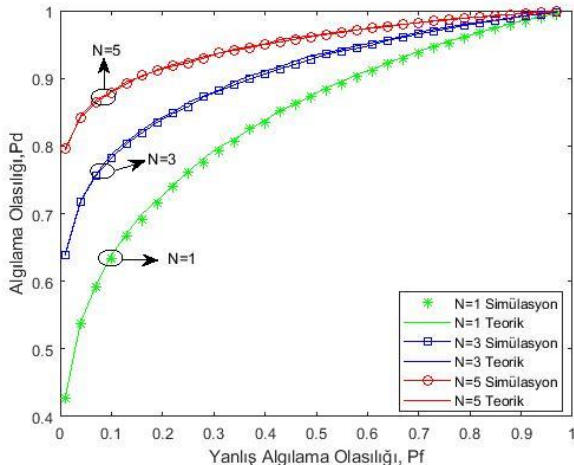
Şekil 5’de $P_f = 0.1$ ve $K=1$ kullanıcı olduğu durumda çevrimiçi öğrenme algoritmasının AWGN kanal üzerinde algılama olasılığı 0.2876 için teorik algılama olasılığı 0.2906’dır. $K=5$ işbirlikçi düğümün olduğu algılama senaryosunda çevrimiçi öğrenme algoritmasının algılama olasılığı 0.7214 iken teorik algılama olasılığı 0.7314 olarak bulunmuştur.



Şekil 6. Rayleigh Kanal için ROC Eğrisi



Şekil 7. Nakagami-m Kanal için ROC Eğrisi



Şekil 8. Rician Kanal için ROC Eğrisi

AWGN ve farklı sönümlü kanallar için elde edilen ROC eğrileri incelendiğinde Rician sönümlü kanalın yayılım

yolunda engel olmaması ve elde edilen işaretin kuvvetli bir doğrudan görüş yol bileşenine sahip olması nedeniyle en iyi başarımla sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, kullanıcı sayısında artış ile birlikte bütün kanallarda algılama başarımları artmıştır. Ancak, işbirlikçi düğüm sayısındaki artış algılama başarımında iyileşme sağlarken algılama süresinde gecikmelere ve enerji tüketiminde artışa sebep olur.

V. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, enerji algılama tabanlı çevrimiçi öğrenme algoritmasının işbirlikçi spektrum algılama başarımları analizi sönümsüz AWGN kanala ilaveten Rayleigh, Nakagami-m ve Rician sönümlü kanal modelleri için yapılmıştır. Toplam hata ifadesine bağlı olarak eşik değeri ifadesinin optimize edilmesi sonucunda algılama başarımları teorik sonuçlara yakınsadığı görülmüştür. Ayrıca, yapılan analizlerden Rician sönümlü kanalın diğer kanallara göre daha iyi spektrum algılama başarımına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmektedir. (Proje No: FDK-2016-6908)

KAYNAKLAR

- [1] Federal Communications Commission, "Spectrum Policy Task Force Report", *FCC 02-155*, Nov. 2002.
- [2] Mitola, J. and Maguire, G. Q., "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal", *IEEE Personal Communications*, Vol. 6, No. 4, pp. 13-18, 1999.
- [3] Mitola, J., "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio", Ph. D. Dissertation, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 2000.
- [4] Ghasemi A. and Sousa, E. S., "Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Requirements, Challenges and Design Trade-offs", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 46, No. 4, pp.32-39, 2008.
- [5] Akyildiz, I. F., Lo, B. F. and Balakrishnan, R., "Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: A Survey", *Physical Communication*, Vol. 4, No. 1, pp. 40-62, 2011.
- [6] Chunhua, S. Wei, Z. and Khaled, B. L., "Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radios under Bandwidth Constraints", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '07)*, pp. 1-5, March 2007.
- [7] Peh, E. and Liang, Y.C., "Optimization for Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '07)*, pp. 27-32, 2007.
- [8] Unnikrishnan, J. and Veeravalli, V.V., "Cooperative Sensing for Primary Detection in Cognitive Radio", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol.2, No.1, pp. 18-27, 2008.
- [9] Wang, W., Zou, W., Zhou, Z., Zhang, H. and Ye, Y., "Decision Fusion Of Cooperative Spectrum Sensing For Cognitive Radio Under Bandwidth Constraints", *IEEE Third International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology*, Vol. 1, pp. 733-736, 2008.
- [10] Unnikrishnan, J. and Veeravalli, V. V., "Cooperative Sensing for Primary Detection in Cognitive Radio", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol. 2, No. 1, pp. 18-27, February 2008.
- [11] Ma, J. Zhao, G. and Li, Y., "Soft Combination and Detection for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 7, No. 11, pp. 4502-4507, 2008.
- [12] Peh, E.C., Liang, Y.C., Guan, Y.L. and Zeng, Y., "Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks With Weighted Decision Fusion Schemes", *IEEE Transactions Wireless Communications*, Vol. 9, No. 12, pp.3838-3847, 2010.
- [13] Liu, X., Jia, M. and Tan, X., "Threshold Optimization of Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks", *Radio Science*, Vol. 48, No. 1, pp. 23-32, 2013.
- [14] Gorcin, A. Qaraqe K.A., Celebi H. and Arslan H., "An Adaptive Threshold Method for Spectrum Sensing in Multi-channel Cognitive Radio Networks", *17th International Conference on Telecommunications (ICT'10)* pp. 425-429, 2010.

- [15] Raman, D. and Singh, N.P. “Improved Threshold Scheme for Energy Detection In Cognitive Radio Under Low SNR”, Association of Computer Electronics and Electrical Engineers, pp.251-256, 2013.
- [16] Chaudhari, S., Lunden, J. and Koivunen, V., “Collaborative Autocorrelation Based Spectrum Sensing of OFDM Signals in Cognitive Radios”, 42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems, pp. 191–196, 2008.
- [17] Jiang, Z., Zhengguang, X., Furong, W., Benxiong, H., and Bo, Z., “Double Threshold Energy Detection of Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio,” in International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, pp. 1-5, 2008.
- [18] Bagwari, A. ve Tomar, G. S. “Adaptive Double-Threshold Based Energy Detector for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks”, International Journal of Electronics Letters, Vol. 1, pp.24-32. 2013.
- [19] Koçkaya, K. and Develi, I. “Bilişsel Radyo Ağlarında Spektrum Algılama için Çevrimiçi Öğrenme Algoritmasına Dayalı Optimum Eşik Modeli”, International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, ISAS 2018, Vol. 2, pp. 434-439, 2018.
- [20] Keraliya, D. and Ashalata, K. “Minimizing the Detection Error in Cooperative Spectrum Sensing Using Teaching Learning Based Optimization (TLBO)”, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol.6, No.2, pp. 495-500. 2017.
- [21] Swamy, B., Bachu, S. and Lavanya, CH. “TLBO Based Spectrum Allocation in Cognitive Radio Network”, International Journal of Multidisciplinary Research and Modern Education (IJMRME), Vol.1, No.1, pp. 91-97, 2015.
- [22] Digham, F. F., Alouini, M. S. and Simon, M. K., “On The Energy Detection of Unknown Signals Over Fading Channels”, IEEE International Conference on Communications (ICC'03), pp. 3575-3579, 2013.
- [23] Maleki, S., Chepuri, S. P. and Leus, G., “Energy and Throughput Efficient Strategies for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radios”, Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2011 IEEE 12th International Workshop on. IEEE, pp. 71–75, 2011.