



Jarque-Bera Testi Tabanlı Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritmasının (JBTLBO) Nakagami-m Sönümlmeli Kanal Üzerinde Spektrum Algılama Başarım Analizi

Spectrum Sensing Performance Analysis of Jarque-
Bera Test Based Teaching-Learning Optimization
Algorithm (JBTLBO) on Nakagami-m Fading
Channel

Kenan KOÇKAYA¹

¹ Divriği Nuri Demirağ Meslek Yüksekokulu, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, TÜRKİYE

kkockaya@cumhuriyet.edu.tr — ORCID > [0000-0002-5253-1511](https://orcid.org/0000-0002-5253-1511)

Makale Bilgisi / Article Information

Makale Türü / Article Types	Araştırma Makalesi / Research Article
Alınış Tarihi / Received	08 Mart / March 2025
Kabul Tarihi / Accepted	18 Nisan / April 2025

Yıl / Year: 2025 | **Cilt / Volume:** 2 | **Sayı / Issue:** 1 | **Sayfa / Pages:** 5-12

Atıf Formatı / Cite as: Koçkaya, K., "Jarque-Bera Testi Tabanlı Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritmasının (JBTLBO) Nakagami-m Sönümlmeli Kanal Üzerinde Spektrum Algılama Başarım Analizi", Hendese, Vol. 2, Issue 1, Pages 5-12, 2025.

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Kenan KOÇKAYA

Jarque-Bera Testi Tabanlı Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritmasının (JBTLBO) Nakagami- m Sönümlmeli Kanal Üzerinde Spektrum Algılama Başarım AnaliziKenan KOÇKAYA*¹ ¹*Divriği Nuri Demirağ Meslek Yüksekokulu, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, TÜRKİYE*

(Alınış / Received: 08.03.2025, Kabul / Accepted: 18.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.04.2025)

Anahtar KelimelerBilişsel Radyo,
Spektrum Algılama,
Eşik Değer,
Jarque-Bera Testi,
TLBO**ÖZ**

Bilişsel radyo, lisans sahibi kullanıcılar tarafından kullanılmayan spektrum boşluklarını algılayan ve radyo çalışma parametrelerini bu bandlarda yayın yapabilecek şekilde uyarlayabilen sistem olarak tanımlanır. Kablosuz haberleşme sistemleri için frekans spektrumunun sınırlı bir kaynak olması nedeniyle, lisanslı ve lisanssız kullanıcılar arasında frekans bandlarının etkin bir şekilde kullanılması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, bilişsel radyoların başarımı için spektrum algılama işlevinin sorunsuz olarak yerine getirilmesi önemli bir süreçtir. Bu çalışmada, Jarque-Bera (JB) testine dayalı öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) algoritmasının kullanıldığı yeni bir hibrit spektrum algılama algoritması geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin benzetim çalışmaları farklı sistem parametreleri ve gürültü seviyeleri için Nakagami- m sönümlmeli kanal modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca benzetim çalışması sonuçlarında, algılama performansının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan ROC eğrilerine de yer verilmektedir. Alınan sonuçlara göre JBTLBO yönteminin başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Spectrum Sensing Performance Analysis of Jarque-Bera Test Based Teaching-Learning Optimization Algorithm (JBTLBO) on Nakagami- m Fading Channel**Keywords**Cognitive Radio,
Spectrum Sensing,
Threshold,
Jarque-Bera Test,
TLBO**ABSTRACT**

Cognitive radio is defined as a system that detects spectrum gaps that are not used by licensed users and adapts the radio operating parameters to broadcast in these bands. Since the frequency spectrum is a limited resource for wireless communication systems, effective use of frequency bands between licensed and unlicensed users is of great importance. Therefore, performing the spectrum sensing function smoothly is an important process for the success of cognitive radios. In this study, a new hybrid spectrum sensing algorithm using the teaching-learning based optimization (TLBO) algorithm based on the Jarque-Bera (JB) test is developed. Simulation studies of the proposed method were carried out on the Nakagami- m fading channel model for different system parameters and noise levels. In addition, the simulation study results also include ROC curves, which are frequently used in the evaluation of detection performance. According to the results, it was observed that the JBTLBO method gave successful results.

Published by Muş Alparslan University, Muş, Türkiye
This is an open access article under the CC BY-NC license

Corresponding Author / Sorumlu Yazar: kcockaya@cumhuriyet.edu.tr

Cilt / Volume: 2

Sayı / Issue: 1

Atf Formatı / Cite as: Koçkaya, K., “Jarque-Bera Testi Tabanlı Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritmasının (JBTLBO) Nakagami- m Sönümlmeli Kanal Üzerinde Spektrum Algılama Başarım Analizi”, Hendese, Vol. 2, Issue 1, Pages 5-12, 2025.

Doi: 10.5281/zenodo.15278179

1. GİRİŞ

Haberleşme sistemleri son yıllarda çok hızlı bir gelişim ve değişim içerisinde. Haberleşmenin bir alt dalı olan kablosuz haberleşme sistemleri insanların beklentilerini ve ihtiyaçlarını karşılayabilmek için gelişen teknolojilerle birlikte kendisini sürekli yenilemektedir. Kablosuz haberleşme insanların herhangi bir mekana olan bağımlılığını ortadan kaldırmış ya da en aza indirmiştir. Bu durumun nihai sonucu olarak kullanıcı sayısında, uygulama sayısında ve kablosuz ağ eleman sayısında çok ciddi bir artış meydana gelmiştir. Son yıllarda ise sanal gerçeklik, nesnelerin interneti gibi uygulama ve teknolojilerin ortaya çıkması spektrum bandlarına olan talebin daha da artmasına neden olmuştur. Spektrumun doğal ve kıt bir kaynak olması nedeniyle artan spektrum band talebinin karşılanabilmesi mevcut spektrum bantlarının verimli bir şekilde kullanılıp kullanılmadığının da araştırılmasına neden olmuştur. Federal Communications Commission (FCC) tarafından yapılan bir araştırmada bazı lisanslı spektrum bandların %95'e varan oranlarda kullanılmadığı açık bir şekilde ortaya konulmuştur. Bu araştırmada yapılan ölçüm sonuçları, "FCC Report of the Spectrum Efficiency Working Group" başlıklı raporda yayınlanmıştır [1-2]. Spektrum sorununa çözüm üretebilmek için son yıllarda az kullanılan, kullanılmayan ya da boş olan bu iletim ortamlarının verimli bir biçimde kullanılmasını sağlamak amacıyla çok sayıda araştırma yapılmıştır. Lisanslı kullanıcılara tahsis edilen spektrumun bu kullanıcılar tarafından kullanılmadığı durumlarda lisansız kullanıcılar tarafından etkin bir şekilde kullanılmasını amaçlayan bilişsel radyo kavramı Mitola tarafından 1999 yılında geliştirilmiştir [3]. Bilişsel radyo çalıştığı ortamdaki boş ya da kullanılmayan frekans bandlarını algılayan ve sistem parametrelerini bu bandlarda yayın yapabilecek şekilde konfigüre edebilen yazılım tabanlı akıllı bir radyo teknolojisi [4].

Spektrum algılama bilişsel radyonun başarımında etkin rol oynamaktadır. Literatür incelendiğinde bilişsel radyo ağlarında spektrum algılama sorununu çözebilmek için uyumlu filtre, çevrimsel-durağan öznitelik tabanlı algılama, özdeğer tabanlı algılama, dalgacık oluşum tabanlı algılama ve enerji tabanlı algılama ve benzeri yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Spektrum tahsis edilen lisanslı kullanıcıya ait önsel bilgilerin (bant genişliği, çalışma frekansı, modülasyon türü vb.) bilinmesi durumunda uyumlu filtre tabanlı yöntemler tercih edilirken lisanslı kullanıcılara ait herhangi bir önsel bilginin bulunmaması durumunda enerji tabanlı algılama yöntemleri tercih edilir [5-10].

Enerji tabanlı algılama yöntemi birincil kullanıcı hakkında önsel bilgiye ihtiyaç duymaması nedeniyle diğer yöntemlerden farklıdır. Ayrıca, bu yöntemin yaygın olarak tercih edilme nedenleri matematiksel hesaplama kolaylığı, işlem maliyet düşüklüğü ve uygulamalarda donanım karmaşıklığının az olmasıdır [11]. Enerji dedektörünün algılama performansının iyileştirilmesi konusu üzerinde literatürde yoğun olarak çalışıldığı görülmektedir. Literatür incelendiğinde çalışmaların birkaç konuya odaklandığı görülmektedir. Birincisi, enerji dedektörü için uygun bir eşik değeri elde etme konusudur. Çünkü eşik değeri, birincil kullanıcının varlığına karar vermede

kritik bir rol oynamaktadır. Eşik değeri ifadesinin doğru tanımlanması ve uygun bir eşik seçilmesiyle algılama performansı önemli ölçüde artmaktadır [12-13]. İkinci olarak, algılama performansını artırmak için çalışmaların işbirlikçi spektrum algılama yöntemlerine de odaklandığı görülmektedir. Birincil kullanıcının varlığı, farklı kullanıcıların tespit sonuçları kullanılarak yumuşak birleştirme veya sert birleştirme teknikleri kullanılarak karşılaştırılır. Yapılan çalışmalar, işbirlikçi spektrum tespit tekniklerinin algılama performansının tek bir bilişsel kullanıcının kullanıldığı yöntemlere göre daha iyi olduğunu göstermiştir [14-15]. Ancak çalışmaların yoğunlaştığı bir diğer alan ise makine öğrenmesi algoritmaları ve derin öğrenme kullanan hibrit enerji tespit algoritmalarıdır. Arama alanında optimum sonuca ulaşmak için optimizasyon algoritmalarının kullanıldığı tekniklerin zor ve karmaşık problemlerin çözümünde yüksek başarı elde ettiği sonucu bir çok yapılan çalışmada görülmektedir [16]. Spektrum algılama işlevinin başarımı uygun bir eşik değeri ifadesinin elde edilmesi bağlıdır. Bu konuda literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır [17-20]. Referans [17]'de spektrum algılama problemini çözmek için uyarlanabilir çift eşik kullanılan bir enerji dedektörü yapısı önerilmiştir. Referans [18]'de spektrum algılama için sabit bir eşik değeri yerine gürültü seviyesine bağlı olarak karakterize edilebilen dinamik bir eşik değerinin elde edildiği sabit yanlış alarm oran (CFAR) yöntemi sunulmuştur. Eşik değeri seçiminde mevcut gürültü seviye koşulları dikkate alınmıştır. Dinamik bir eşik seçiminin algılama başarımının sabit bir eşik değere göre daha iyi sonuç verdiği analizlerle gösterilmiştir. Referans [19]'da düşük SNR ortamında algılama performansını artırmak için Wigner-Ville dağılımı kullanılmıştır. Çapraz ilinti terimlerinin etkileri azaltılarak optimum bir karar eşiği elde edilmiş ve algılama başarımı artırılmıştır. Referans [20]'de Gauss-Hetmite entegrasyonu yöntemi kullanılarak Nakagami-m ve Log-normal sönümleme kanalları üzerinde algılama ve ortalama alan olasılıklarına ilişkin matematiksel ifadeler türetilerek spektrum algılama performansı ölçülmüştür. Buna ilaveten, düşük işaret gürültü oranına (signal noise ratio, SNR) bağlı olarak optimize edilmiş bir eşik değeri ifadesi tanımlanmıştır. Eşik değeri ifadesinin optimize edilmesine bağlı olarak, algılama olasılığında önemli bir iyileşme olduğu yapılan çalışmada açık bir biçimde vurgulanmıştır. Eşik değeri ifadesi gürültü gücüne bağlı olarak tanımlanır. Gürültü gücü belirsizliği (gölgeleme, sönümleme, algılama zamanı ve bilişsel radyo kullanıcısının konumu ve benzeri değişkenlere bağlı olması) kritik bir eşik değeri elde edilememesine neden olmakta ve bu durumun bir sonucu olarak spektrum algılama başarımı oldukça düşmektedir. Referans [21]'de, gürültü belirsizliğinin yıkıcı etkilerini en aza indirmek için yeni bir spektrum algılama algoritması tanıtılmıştır. Örneklenmiş bir sinyal üzerindeki sembol periyodunun toplam üssüne dayalı bir birleştirme vektörü tanımlanarak, sinyalin enerji/SNR oranına bağlı test istatistiği hesaplanmıştır. Önerilen yöntemin performansı, bir katkısız beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) kanalında analiz edilmiş ve algılama başarımının arttığı görülmüştür. Referans [22]'de düşük SNR rejiminde spektrum algılama performansını iyileştirmek ve toplam hata olasılığını azaltmak amacıyla uyarlanabilir çift eşik ifadesi kullanan bir yöntem tanıtılmıştır. Enerji dedektörü için ideal bir eşik ifadesi elde edilmesi amacıyla algılama hatası analiz edilmiş ve çift eşik uyarlanabilir algılama şeması sunulmuştur. Analiz

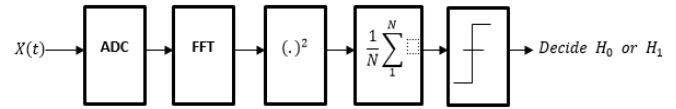
sonucunda algılama performansının arttığı ve algılama hatalarının en aza indirildiği gösterilmiştir. Referans [23]'de bilişsel radyo ağlarında iki eşikli enerji algılamaya dayalı bir işbirlikçi spektrum algılama biçimi sunulmuştur. Geleneksel iki eşikli enerji algılamada algılama hatasını en aza indirmek ve ortalama yükü azaltmak için, gözlenen enerjiyi iki bitlik yüke niceleyerek yumuşatılmış sert birleşim şeması önerilmiştir. Simülasyon sonuçları ile önerilen algılama şemasının AWGN kanal üzerinde geleneksel yöntemlere göre daha iyi bir algılama performansına sahip olduğu gösterilmiştir. Referans [24]'de JB testine dayalı kör spektrum algılama yöntemi önerilmiştir. JB testinin analitik hesaplamasına göre bir eşik değeri ifadesi belirlenerek test istatistiği ile karşılaştırılmıştır. Monte Carlo simülasyon sonuçlarına göre, dijital TV test sinyali için FFT boyutu ve örnek sayısı arttıkça algılama başarımında arttığı gösterilmiştir. Referans [25]'de öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması kullanıldığı enerji algılama tabanlı spektrum algılama yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemle birincil ve ikincil istatistiksel hata olasılığına bağlı olarak toplam hata fonksiyonu elde edilmiştir. Toplam hata fonksiyonunun çözüm kümesi yardımıyla yeni bir eşik tanımlanmış ve test istatistiği ile karşılaştırılarak algılama performansı ölçülmüştür. Literatürde sönümleme, gölgeleme vb. gibi algılama performansının düşmesine neden olan faktörlerin etkisini en aza indirmek için işbirlikçi spektrum algılama yöntemleri bir çözüm olarak sunulmuştur [26-27]. Tallataf ve arkadaşları [26], bulanık mantık temelli işbirlikçi enerji algılama yöntemi önerilmişlerdir. Bulanık mantık süreci bulanıklaştırma, çalıştırma motoru ve durulastırma aşamalarından oluşturulmuştur. Düğüm arasındaki algılama başarımları karşılaştırılarak en doğru kestirimin yapılması hedeflenmiştir. Çalışmanın güvenilirlik faktörü SNR, algılama farkları ve eşik değeri ifadesinden faydalanılarak elde edilmiştir. Yöntemin algılama başarımı güvenilirlik faktörüne bağlı olarak analiz edilmiştir. Referans [27]'de Nakagami- m ve Weibull sönümlemeli kanallar üzerinde spektrum algılama probleminin çözümü için işbirlikçi enerji algılama yöntemi önerilmiştir. İşbirlikçi spektrum algılama ile algılama performansında iyileşme sağlanabileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada önerilen JBTLBO modeli, bilişsel radyo ağlarında spektrum algılama performansını önemli ölçüde iyileştiren birkaç yeni özellik sunmaktadır. Enerji algılama için JB testine dayalı yanlış algılama olasılığını ve toplam hata olasılığını en aza indirmek için TLBO algoritması kullanılarak sert bir eşik yerine uyarlanabilir bir eşik değeri ifadesinin elde edildiği uyarlanabilir bir eşik mekanizması tanımlanır. Böylece, önerilen modelin, düşük SNR rejiminde mevcut yöntemlere kıyasla daha yüksek algılama performansına sahip olduğu gösterilmiştir. Önerilen yöntemin algılama performans başarım analizi Nakagami- m sönümlemeli kanal üzerinde yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Enerji Algılama Sistem Modeli

Bilişsel radyo sistemlerinde lisanslı kullanıcılar hakkında bir önsel bilginin olmaması halinde spektrum boşluklarını belirlemek için enerji tabanlı spektrum algılama yöntemi kullanılır [11]. Enerji algılama yaklaşımının temeli, alınan enerji ile önceden tanımlanan eşik değerin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu karşılaştırma işleminin sonucuna göre

lisanslı kullanıcının varlığına ya da iletim kanalının boş olduğuna karar verilir. Eğer iletim ortamı boş ise lisansız kullanıcılar herhangi bir girişime neden olmaksızın bu spektrum boşluklarını fırsatçı bir biçimde kullanabilirler. Enerji detektörüne ait blok şema Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Enerji Detektör Blok diyagramı

Birincil kullanıcı işaretinin var olup olmadığına ilişkin kararı vermek için aşağıda tanımlanan ikili hipotez testi oluşturulur [27]:

$$\begin{aligned} H_0: y[n] &= w[n], & \text{İşaret yok} \\ H_1: y[n] &= x[n] + w[n], & \text{İşaret var} \end{aligned} \quad (1)$$

Burada $y[n]$ alınan işareti, $w[n]$ sıfır ortalamalı ve σ_n^2 varyansı olan toplanabilir beyaz Gauss gürültüsünü (AWGN), $x[n]$ ise σ_s^2 varyanslı iletilen işaret olarak tanımlanır.

$n = 1, 2, 3, \dots, N$ olmak üzere N gözlemlenen pencere sayısını göstermektedir. Klasik enerji algılama yönteminde, test istatistik değeri (T) ile gürültü gücüne bağlı olarak elde edilen sabit bir eşik değeri (λ) karşılaştırılır ve spektrumun dolu ya da boş olduğuna karar verilir. Enerji detektörü için test istatistiği, hızlı fourier dönüştürücü (FFT) bileşenleri dizisi olarak gösterilebilir. Enerji sezici için sinyalin enerjisini temsil eden test istatistik değeri Denklem (2)'de tanımlanmıştır [28].

$$T = \sum_{n=1}^N (y[n])^2 \quad (2)$$

Merkezi limit teoremine göre test istatistiği dağılımı örneklem sayısı yeterli ise Gauss dağılımına dönüşür [5]. Denklem (2)'de tanımlanan T test istatistik değeri eşik değeri ifadesi ile karşılaştırılır. T test istatistik değeri eşik değerden büyük ise işaretin varlığına, küçük ise birincil kullanıcı işaretinin olmadığına yani iletim ortamının boş olduğuna karar verilir.

$$\text{Eğer } T \geq \lambda \quad \text{İşaret var} \quad (3)$$

$$\text{Eğer } T < \lambda \quad \text{İşaret yok} \quad (4)$$

Enerji algılama yaklaşımının kullanıldığı spektrum algılama sistem modelinde algılama performansı, algılama olasılığı (P_d) ve yanlış algılama olasılığı (P_{fa}) olmak üzere iki parametreye bağlı olarak ölçülür. P_d ve P_{fa} ait matematiksel ifadeler sırasıyla Denklem (5) ve Denklem (6)'da tanımlanmıştır.

$$P_d = P(T > \lambda / H_1) = Q \left(\frac{\lambda - N(\sigma_n^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2N(\sigma_n^2 + \sigma_s^2)^2}} \right) \quad (5)$$

$$P_{fa} = P(T > \lambda/H_0) = Q\left(\frac{\lambda - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) \quad (6)$$

Burada $Q(x)$ Denklem (7)'de belirtildiği gibi tanımlanır.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \quad (7)$$

Sonuç olarak, enerji tabanlı spektrum algılama modellerinin başarımı enerji detektörü için kritik öneme sahip optimum bir eşik değeri ifadesinin elde edilmesine bağlıdır. Eşik değeri ifadesinin doğru bir şekilde belirlenmesi algılama performansında artışa neden olmaktadır.

2.2. Jarque-Bera Testi

Veri analizinde, veri setinin dağılımını ölçmek ve normallikten ne kadar uzaklaştığını saptamak için istatistiksel yöntemler kullanılır. Jarque-Bera testi bir örnekleme ile ilgili n sonlu sayıda örneklemden kurulu bir veri kümesinin normal dağılıma uyup uymadığının belirlenmesinde kullanılır. JB testi eğiklik ve basıklık ölçülerine dayanan bir testtir [29-32]. JB testinin temel felsefesi ele alınan veri dağılımının normallikten sapma derecesinin belirlenmesine dayanmaktadır. Bunun için normal dağılım eğrisinin geometrik özelliklerinden olan çarpıklık ve basıklık ölçüleri kullanılır. Bu amaçla, JB uyum testi kullanılarak örneklem veri kümesinin normal dağılıma sahip olup olmadığının istatistiksel olarak belirlenebilmesi için,

H_0 : Veriler normal dağılımlıdır,

H_1 : Veriler normal dağılımlı değildir,

şeklinde sıfır hipotezi kurulur. Sıfır hipotezi ile ilgili test büyüklüğü, örneklem veri kümesinin basıklık ve çarpıklık ölçütlerinin birlikte kullanılması ile elde edilir. Bu nedenle, sıfır hipotezi ile ilgili olarak, beklenen çarpıklığın sıfır değerinde olması istenirken benzer biçimde basıklık fazlalığının ise üç değerinde olması istenmektedir. Bu amaç doğrultusunda birleşik bir hipotez geliştirilmiş ve Denklem (8)'de tanımlanan test büyüklüğüne ilişkin ifade kullanılarak sıfır hipotezinin geçerliliği araştırılmıştır.

$$JB = \frac{n}{6} \left(S^2 + \frac{(K-3)^2}{4} \right) \quad (8)$$

Burada, n örneklem sayısı iken S örneklem çarpıklık ölçüsünü ve K ise örneklem basıklık ölçüsünü ifade eder. Bu ifadelerle ilişkin matematiksel denklemler sırasıyla aşağıda tanımlanmıştır.

$$S = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{\mu_3}{(\sigma^2)^{3/2}} \quad (9)$$

$$K = \frac{\mu_4}{\sigma^4} = \frac{\mu_4}{(\sigma^2)^2} \quad (10)$$

2.3. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması (Teaching Learning-Based Optimization-TLBO)

Metasezgisel algoritmalarından biri olan ve R.V. Rao tarafından önerilen öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon

(TLBO) algoritması karmaşık problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılır [33]. Bir sınıfın öğretim sürecinden esinlenerek tasarlanmıştır. Sınıf, öğretmen ve öğrencilerden oluşur. TLBO algoritmasının iki temel bileşeni öğretmen ve öğrencidir. Öğretmen-Öğrenci ve Öğrenci-Öğrenci arasındaki etkileşime bağlı olarak öğrenme işlevi gerçekleşir. Öğrenme işlevinin iki aşaması vardır.

İlk aşamada öğrencilerin bilgi düzeyinin düşük olduğu ya da hiç bir bilgiye sahip olmadığı varsayımı ile öğrenme işlevinin öğretmen ile öğrenci arasında gerçekleştiği kabul edilir. Başka bir ifade ile bilginin öğretmenden öğrenciye doğrudan aktarıldığı kabul edilir. Başka bir ifadeyle öğrenciler öğretmenden bilgi edinerek bilgi düzeylerini arttırmaya ya da notlarını iyileştirmeye çalışırlar. Popülasyondaki en iyi öğrenci öğretmen olarak tanımlanır ve öğrencilerin ortalaması öğretmene doğru yönlendirilir. Mevcut ortalama ve istenilen ortalama vektörlerinden rastgele ağırlıklandırılmış bir diferansiyel vektör oluşturulur. Yeni bir öğrenci seti elde edilmesi amacıyla mevcut öğrenenler popülasyonuna eklenir [33].

$$x_i^{j,new} = x_i^{j,old} + rand() \times [x_i^{teacher} - T_F M_i] \quad (11)$$

M_i , sınıfın yani popülasyonun ortalama değeri, $x_i^{teacher}$ öğreticiyi (yani en iyi çözümü), T_F öğretme faktörünü ve $x_i^{j,new}$ ve $x_i^{j,old}$ çözümün yeni ve eski değerlerini göstermektedir. T_F öğretme faktörü ve M_i , sınıfın yani popülasyonun ortalama değeri olup aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$T_F = round(1 + rand(1, D)) \quad (12)$$

$$M_i = \frac{1}{NP} \sum_{i=1}^{NP} x_i, i = 1, 2, 3, \dots, NP \quad (13)$$

Burada $j = 1, 2, 3, \dots, NP$, $i = 1, 2, 3, \dots, D$ olmak üzere, NP sınıf mevcudu, D ise tasarım değişkenidir.

Öğrenci Aşaması: TLBO algoritmanın bu aşamasında öğrenciler birbirleri ile etkileşim içerisine girerek bilgi düzeylerini artırır ya da notlarını iyileştirirler. Öğrenci aşamasında her öğrenci diğer öğrenciler ile rastgele etkileşim içerisindedir. Eğer bir öğrenci, kendinden daha fazla bilgiye sahip bir öğrenci ile etkileşime girerse yeni bilgiler öğrenir. Bu öğrenme işlemi sonucunda öğrencinin notlarında bir iyileşme meydana gelir. Bu duruma ilişkin matematiksel ifadeler Denklem (14)'te sunulmuştur.

$$x_i^{j,new} = \begin{cases} x_i^{j,old} + rand(1, D) \times [x^k - x^j], & f(x^k) < f(x^j) \\ x_i^{j,old} + rand(1, D) \times [x^j - x^k], & otherwise \end{cases} \quad (14)$$

Burada, $k (k \neq j) [1, NP]$ arasında rastgele bir tamsayıdır.

2.4. Eşik Değer İfadesinin Optimizasyonu

Jarque-Bera testine dayalı spektrum algılama algoritmasının performansını değerlendirmek için kullanılan eşik değer ifadesi Denklem (15)'te verilmiştir [34].

$$\lambda = \mu_T + \sigma_T Q^{-1}(P_{fa}) \quad (15)$$

Test istatistik değeri T , yeterince büyükse merkezi limit teoremine göre ortalaması μ_T , varyansı σ_T olan dağılım Gauss dağılımına yakınsayabilir.

Jarque-Bera testine dayalı olarak elde edilen eşik değer ifadesinden yararlanılarak [35]'de tanımlanan alt eşik ve üst eşik ifadeleri matematiksel olarak aşağıdaki gibi sırasıyla yeniden tanımlanmıştır.

$$\lambda_1 = \lambda + \Delta\lambda \quad (16)$$

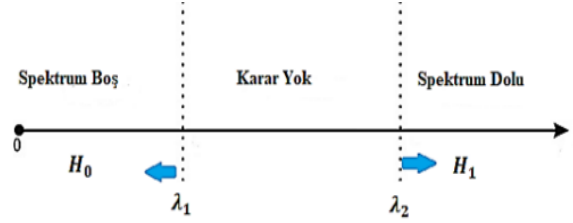
$$\lambda_2 = \lambda - \Delta\lambda \quad (17)$$

Burada normalize edilmiş eşik değer ifadesi $\Delta\lambda$ ise;

$$\Delta\lambda = \frac{\left[(x^2 - x) + \frac{1}{N\sigma_T} \sqrt{(x+1)((x^2+x) - \frac{2\sigma_T^2 x^2}{\ln \frac{1}{x}})} + \sqrt{\frac{2}{N}} Q^{-1}(P_{fa}) + 1 \right]}{x + \sqrt{\frac{2}{N}} (xQ^{-1}(P_{md}) + \sqrt{\frac{2}{N}} Q^{-1}(P_{fa})) - 1} \quad (18)$$

şeklinde tanımlanır. Buradaki x ifadesi SNR bağımlı değişkeni ifade etmekte olup aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

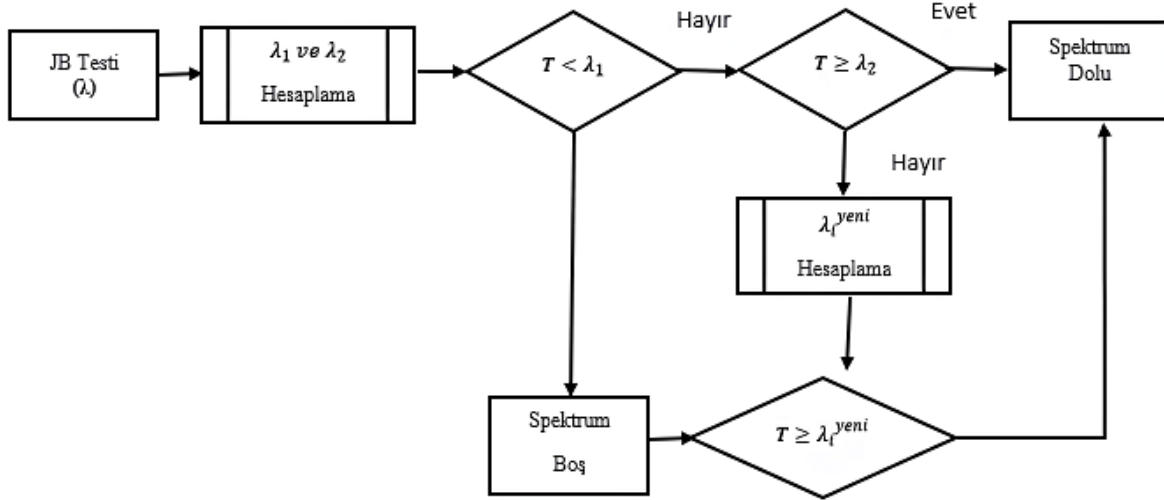
$$x = \gamma + 1 \quad (19)$$



Şekil 2. Çift Eşik Temelli Enerji Algılama Şeması [35].

Alt eşik ve üst eşik ifadelerine bağlı olarak spektrumun dolu ya da boş olduğuna karar verilse de alt eşik ve üst eşik arasında kalan bölgede seçilen bir eşik değeri için algılama performansında belirsizliğe neden olmaktadır. Bu belirsizliği minimize etmek ve algılama performansını iyileştirmek için TLBO algoritması kullanılarak eşik değer ifadesi yeniden tanımlanır.

Bu çalışmada önerilen JB-TLBO yaklaşımının kullanıldığı spektrum algılama şemasına ait akış diyagramı Şekil 3'de sunulmuştur.



Şekil 3. JB-TLBO Akış Şeması

2.5. Nakagami-m Sönümlleme Kanal Modeli

Kablosuz iletişimde iletim ortamının homojen bir yapıda olmamasından kaynaklanan belirsizliklerden dolayı kanal kestirimi oldukça zordur. Vericiden gönderilen işaret alıcıda yayılma, saçılma ve kırılma gibi kanaldan kaynaklı nedenlerden ötürü değişmiş bir biçimde alınır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için istatistiksel dağılımlardan ve bu dağılımların kullanıldığı yöntemlerden faydalanılır. İstatistiksel dağılım yöntemleri kullanılarak farklı haberleşme kanalları modellenilebilir. Çok yönlü bir sönümlleme modeli olan Nakagami-m dağılımı, tek bir parametreyi ayarlayarak, geniş bir çerçevede modelleme yapılmasının sağlaması nedeniyle

literatürde yaygın olarak kullanılan bir modeldir [36-38]. Buradaki m sönümlleme parametresidir ve görüş hattı sinyal gücünün çoklu yol bileşenine oranı olarak tanımlanır. Değeri $1/2$ ile ∞ arasında değişir. Nakagami-m dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu eşitlik 20'deki gösterildiği gibi tanımlanır [39].

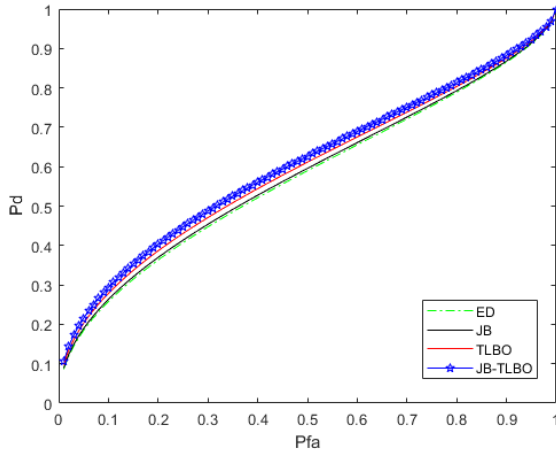
$$f_y(x) = \frac{1}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m \gamma^{m-1} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad (20)$$

$$P_d = \frac{1}{\Gamma(m)2^{m-1}} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m \left[\left(\frac{2^{m-1}(m-1)!}{\left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m} \frac{\bar{\gamma}}{m+\bar{\gamma}} e^{\frac{-\lambda}{2} \frac{m}{m+\bar{\gamma}}} \right) \left(1 + \frac{m}{\bar{\gamma}} \right) \left(\frac{m}{m+\bar{\gamma}}\right)^{m-1} \right] + \left[x L_{m-1} \left(\frac{-\lambda}{2} \frac{\bar{\gamma}}{m+\bar{\gamma}} \right) + \sum_{n=0}^{m-2} \left(\frac{m}{m+\bar{\gamma}}\right)^n L_n \left(\frac{-\lambda}{2} \frac{\bar{\gamma}}{m+\bar{\gamma}} \right) \right] \Gamma(m) \left(\frac{2\bar{\gamma}}{m+\bar{\gamma}}\right)^m e^{\frac{-\lambda}{2}} \sum_{n=1}^{m-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^n}{2n!} {}_1F_1 \left(m; n+1; \frac{-\lambda}{2} \frac{\bar{\gamma}}{m+\bar{\gamma}} \right) \quad (21)$$

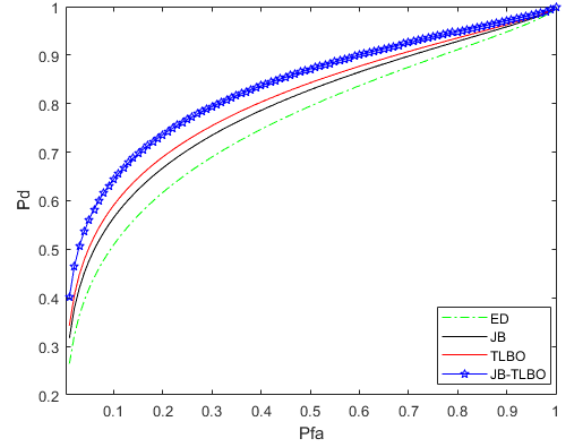
Burada ${}_1F_1(,;,,)$ konfluent hipergeometrik fonksiyondur. $L(.)$ n dereceden Laguerre polinomudur [34].

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

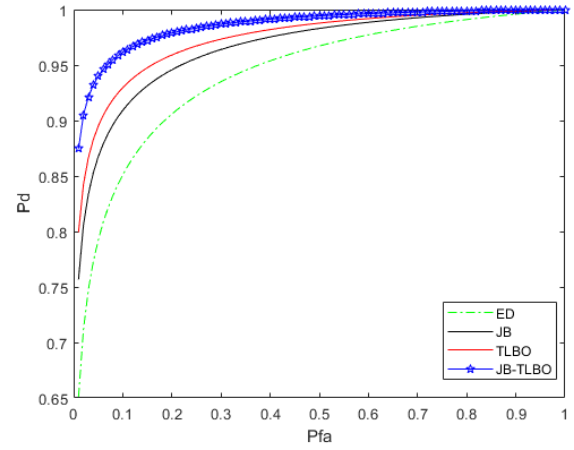
Önerilen yöntemin spektrum algılama başarımı Monte Carlo simülasyonları ile değerlendirilmiştir. İlk olarak test istatistiği hesaplanmış ve test istatistiğine bağlı olarak elde edilen eşik değeri ifadesi JBTLBO yaklaşımı ile yeniden tanımlanmıştır. Daha sonra spektrum algılama performansı Nakagami- m sönümlü kanal modeli üzerinde farklı sistem parametreleri için MATLAB2019b programında analiz edilmiştir. Sönümleme parametresi (m), 0,5 ile ∞ arasında değişir. Nakagami- m dağılımı $m=1$ olduğunda Rayleigh dağılımına, $m=\infty$ olduğunda ise AWGN dağılımına yakınsamaktadır. Simülasyonlarda örneklem sayısı 100 ve 500, iterasyon sayısı 100 olarak seçilmiş ve farklı yöntemlerin algılama başarımları sırasıyla -10dB ve -5dB SNR değerlerinde farklı m değerleri için araştırılmıştır. Şekil 4-7 detaylı olarak incelendiğinde algılama başarımı en iyi olan yöntemin JBTLBO olduğu açık bir şekilde görülmektedir ve grafiklere ilişkin sayısal veriler Çizelge 1’de detaylı olarak sunulmuştur.



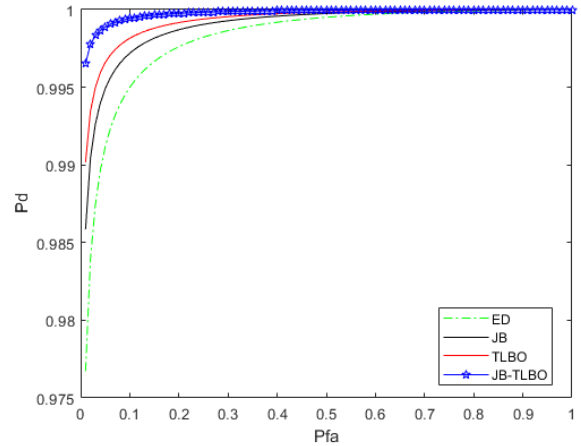
Şekil 4. Nakagami- m Sönümlü Kanal için $P_d - P_{fa}$ ROC Eğrisi ($m=1$, SNR=-10dB).



Şekil 5. Nakagami- m Sönümlü Kanal için $P_d - P_{fa}$ ROC Eğrisi ($m=3$, SNR=-10dB).



Şekil 6. Nakagami- m Sönümlü Kanal için $P_d - P_{fa}$ ROC Eğrisi ($m=1$, SNR=-5dB).



Şekil 7. Nakagami- m Sönümlü Kanal için $P_d - P_{fa}$ ROC Eğrisi ($m=3$, SNR=-5dB).

Çizelge 1. Nakagami- m Sönümlü Kanal için Algılama Olasılığı Değer Tablosu ($P_{fa} = 0,1$)

Nakagami- m Sönümlü Kanal	Sönümleme Parametresi	$m=1$ (N=100)		$m=3$ (N=500)	
	SNR	-10dB	-5dB	-10dB	-5dB
	ED	0,2577	0,5091	0,8510	0,9950
	JB	0,2634	0,5650	0,9092	0,9972
	TLBO	0,2786	0,5907	0,9297	0,9982
	JBTLBO	0,2940	0,6445	0,9616	0,9994

IEEE 802.22 standartlarına göre izin verilen $P_{fa} = 0,1$ düzeyinde algılama olasılığına ilişkin sayısal veriler çizelge 1'de paylaşılmıştır. Çizelge 1 incelendiğinde algılama olasılığının örneklem sayısına, m sönümleme parametresine ve SNR'ye bağımlı olarak değiştiği görülmektedir. JBTLBO yaklaşımının algılama performansının $m=1$, $N=100$ ve SNR=-10 dB için ED göre %14, JB göre %11,5; TLBO göre %5,5 daha iyi olduğu bulunmuştur. Yapılan analizler sonucunda en yüksek algılama başarımına sahip olan algoritmanın JBTLBO olduğu görülmüştür.

4. SONUÇ

Kablosuz haberleşme sistemleri sunduğu hizmet çeşitliliği, hız ve mekânsal bağımsızlık nedeniyle insan hayatının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu durum kullanıcı sayısında ve spektrumuna olan talep de artışa neden olmuştur. Doğal ve kıt bir kaynak olan spektrumun etkin bir şekilde kullanılması haberleşme sürekliliği için önemli bir araştırma alanı olmuştur. Spektrumun etkin bir şekilde kullanılması konusunda bilişsel radyo kavramı bir çözüm olarak sunulmuştur. Bilişsel radyonun spektrum boşluklarının hızlı ve yüksek doğrulukta algılanması başarımı açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada; bilişsel radyonun spektrum algılama başarımını arttırmak için JBTLBO algoritmasının kullanıldığı yeni bir enerji algılama yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin performans analizi Nakagami- m sönümlü kanal modeli üzerinde farklı sistem parametreleri için analiz edilmiştir. Benzetim çalışmalarından elde edilen bulgular JBTLBO yönteminin düşük SNR rejiminde algılama performansının JB, TLBO ve geleneksel enerji algılama yöntemlerine karşılaştırıldığında daha iyi algılama performansına sahip olduğu açık bir şekilde göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Federal Communications Commission Spectrum Policy Task Force, Report of the Spectrum Efficiency Working Group, Teknik Rapor, ABD, 2002.
- [2] Tuna, E., Karagöz, M., "Gelecek nesil ağlar için spektrum tahsisinde yeni bir yaklaşım: Bilişsel radyo", International Journal of Engineering Research and Development, Cilt 4, Sayı 1, Sayfa 25-31, 2012.
- [3] Mitola, J., Maguire, G. Q., "Cognitive radio: Making software radios more personal", IEEE Personal Communications Magazine, Cilt 6, Sayı 4, Sayfa 13-18, 1999.
- [4] Mitola, J., "Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio", Doktora Tezi, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, İsveç, 2000.
- [5] Bektaş, C., Akan, A., "Enerji tabanlı spektrum algılamada dalgacık dönüşümü yaklaşımı", XX. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı (SIU), Sayfa 1-4, Muğla, 18-20 Nisan 2012.

- [6] Zeng, Y., Liang, Y. C., Hoang, A. T., Zhang, R., "A review on spectrum sensing for cognitive radio: Challenges and solutions", EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Sayfa 1-15, 2010.
- [7] Haykin, S., "Cognitive radio: Brain empowered wireless communications", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Cilt 23, Sayı 2, Sayfa 201-220, 2005.
- [8] Yücek, T., Arslan, H., "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Cilt 11, Sayı 1, Sayfa 116-130, 2009.
- [9] Tandra, R., Sahai, A., "SNR walls for signal detection", IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, Cilt 2, Sayı 1, Sayfa 4-17, 2008.
- [10] Jaewoo, S., Srikant, R., "Improving channel utilization via cooperative spectrum sensing with opportunistic feedback in cognitive radio networks", IEEE Communications Letters, Cilt 19, Sayı 6, Sayfa 1065-1068, 2015.
- [11] Urkowitz, H., "Energy detection of unknown deterministic signals", Proceedings of the IEEE, Cilt 55, Sayı 4, Sayfa 523-531, 1967.
- [12] Wang, N., Gao, Y., Cuthbert, L., "Spectrum sensing using adaptive threshold based energy detection for OFDM signals", 2014 IEEE International Conference on Communication Systems, Sayfa 359-363, Singapur, 2014.
- [13] Kumar, A., Thakur, P., Pandit, S., Singh, G., "Analysis of optimal threshold selection for spectrum sensing in a cognitive radio network: An energy detection approach", Wireless Networks, Cilt 25, Sayı 7, Sayfa 3917-3931, 2009.
- [14] Wu, Q., Zhang, J., Feng, K., Li, K., "Differential energy-driven adaptive dual-threshold collaborative spectrum sensing algorithm", 2024 IEEE 7th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Sayfa 1914-1917, Chongqing, 2024.
- [15] Zhang, W., Mallik, R. K., Letaief, K. B., "Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks", 2008 IEEE International Conference on Communications (ICC), Sayfa 3411-3415, Beijing, 2008.
- [16] Xie, J., Fang, J., Liu, C., Li, X., "Deep learning-based spectrum sensing in cognitive radio: A CNN-LSTM approach", IEEE Communications Letters, Cilt 24, Sayı 10, Sayfa 2196-2200, 2020.
- [17] Bagwari, A., Tomar, G. S., "Adaptive double-threshold based energy detector for spectrum sensing in cognitive radio networks", International Journal of Electronics Letters, Cilt 1, Sayfa 24-32, 2013.
- [18] Plata, D. M. M., Reátiga, Á. G. A., "Evaluation of energy detection for spectrum sensing based on the dynamic selection of detection-threshold", Procedia Engineering, Cilt 35, Sayfa 135-143, 2012.
- [19] Ajadi, W. O., Sani, S. M., Tekanyi, A. M. S., "Estimation of an improved spectrum sensing threshold for cognitive radio using smoothed pseudo-Wigner-Ville distribution", International Journal of Computer Applications, Cilt 168, Sayı 12, 2017.
- [20] Pappu, K. V., Sanjay, K. S., Priyanka, J., "Performance evolution of ED-based spectrum sensing in CR over Nakagami-m/shadowed fading channel with MRC reception", AEU - International Journal of Electronics and Communications, Cilt 83, Sayfa 512-518, 2018.
- [21] Bogale, T. E., Vandendorpe, L., "Max-min SNR signal energy based spectrum sensing algorithms for cognitive radio networks with noise variance uncertainty", IEEE Transactions on Wireless Communications, Cilt 13, Sayı 1, Sayfa 280-290, 2014.
- [22] Mahendru, G., Shukla, A. K., Patnaik, L. M., "An optimal and adaptive double threshold-based approach to minimize error probability for spectrum sensing at low SNR regime", Journal of

- Ambient Intelligence and Humanized Computing, Sayfa 1-10, 2022.
- [23] Liu, S. Q., Hu, B. J., Wang, X. Y., "Hierarchical cooperative spectrum sensing based on double thresholds energy detection", IEEE Communications Letters, Cilt 16, Sayı 7, Sayfa 1096-1099, 2012.
- [24] Subekti, A., Rachmana, N. S., Suksmono, A. B., "A blind spectrum sensing for cognitive radio based on Jarque-Bera normality test", International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Cilt 8, Sayı 2, Sayfa 402-412, 2016.
- [25] Keraliya, D., Ashalata, K., "Minimizing the detection error in cooperative spectrum sensing using teaching learning based optimization (TLBO)", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Cilt 6, Sayı 2, Sayfa 495-500, 2017.
- [26] Tallataf, R., Adnan, R., Ahmad, N. A., "Reliability factors based fuzzy logic scheme for spectrum sensing", World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Information and Communication Engineering, Cilt 12, Sayı 2, 2018.
- [27] Ranjeet, M., Nallagonda, S., Anuradha, S., "Optimization analysis of improved energy detection based cooperative spectrum sensing network in Nakagami-m and Weibull fading channels", Journal of Engineering Science and Technology Review, Cilt 10, Sayı 2, Sayfa 114-117, 2017.
- [28] Xuping, Z., Jianguo, P., "Energy-detection based spectrum sensing for cognitive radio", IET Conference on Wireless, Mobile and Sensor Networks, Sayfa 944-977, Şanghay, 12-14 Aralık 2007.
- [29] Thadewald, T., Büning, H., "Jarque-Bera test and its competitors for testing normality: A power comparison", Journal of Applied Statistics, Cilt 34, Sayı 1, Sayfa 87-105, 2007.
- [30] Aslam, M., Sherwani, R. A. K., Saleem, M., "Vague data analysis using neutrosophic Jarque-Bera test", PLOS ONE, Cilt 16, Sayı 12, e0260689, 2021.
- [31] Xu, P., Deng, Y., Su, X., Mahadevan, S., "A new method to determine basic probability assignment from training data", Knowledge-Based Systems, Cilt 46, Sayfa 69-80, 2013.
- [32] Jarque, C. M., Bera, A. K., "A test for normality of observations and regression residuals", International Statistical Review, Cilt 55, Sayı 2, Sayfa 163-172, 1987.
- [33] Rao, R. V., Savsani, V. J., Vakharia, D. P., "Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems", Computer-Aided Design, Cilt 43, Sayfa 303-315, 2011.
- [34] Subekti, A., Rachmana, N. S., Suksmono, A. B., "A Jarque-Bera test based spectrum sensing for cognitive radio", 2014 8th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA), Sayfa 1-4, IEEE, 2014.
- [35] Koçkaya, K., "Improvement of spectrum perception performance in cognitive radio networks using energy sensing based collaborative online learning algorithm", Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2021.
- [36] Yacoub, M. D., Bautista, J. V., De Rezende Guedes, L. G., "On higher order statistics of the Nakagami-m distribution", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Cilt 48, Sayı 3, Sayfa 790-794, 1999.
- [37] Karagiannidis, G. K., Zogas, D. A., Kotsopoulos, S. A., "On the multivariate Nakagami-m distribution with exponential correlation", IEEE Transactions on Communications, Cilt 51, Sayı 8, Sayfa 1240-1244, 2003.
- [38] Duong, T. Q., Da Costa, D. B., El Kashlan, M., Bao, V. N. Q., "Cognitive amplify-and-forward relay networks over Nakagami-m fading", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Cilt 61, Sayı 5, Sayfa 2368-2374, 2012.
- [39] Simon, M. K., Alouini, M. S., Digital communication over fading channels, John Wiley & Sons, 2004.