

Araştırma Makalesi - Research Article

## Bilişsel Kablosuz Algılayıcı Ağlar için IEEE 802.22 tabanlı Düğüm Yerleştirme Yaklaşımının Performans Değerlendirmesi

### Performance Analysis of IEEE 802.22 based Node Placement Approach for Cognitive Wireless Sensor Networks

Hüseyin Ekici<sup>1</sup>, Muhammed Enes Bayrakdar<sup>2\*</sup>

Geliş / Received: 25/11/2024

Revize / Revised: 01/01/2025

Kabul / Accepted: 04/01/2025

#### ÖZ

Bu çalışmada, bilişsel kablosuz bölgesel alan ağı (WRAN) teknolojisi tabanlı bir algılayıcı ağ yapısı önerilmektedir. WRAN teknolojisinde, bir tüketici tesis ekipmanı (CPE) ve bir baz istasyonu, mevcut haberleşme sistemlerine herhangi bir zararlı müdahaleye neden olmadan, sabit kanallar aracılığıyla fırsatçı bir şekilde iletişim kurmaktadır. Ağ yapısında, CPE'ler sıcaklık, basınç gibi çevresel verileri algılayıp baz istasyonuna iletmek amacıyla zaman bölme çoklu erişim (TDMA) tekniğini kullanmaktadır. Önerilen algılayıcı düğüm yerleştirme tekniği sayesinde, geniş bir alana çok sayıda düğüm yerleştirilmiştir. Ayrıca, ağ sürdürülebilirliğini artırmak için bulanık mantık tabanlı röle seçimi yaklaşımı önerilmiştir. Çevresel parametreleri tespit etmek için algılayıcı düğümler tüm bölgeyi kapsayacak şekilde yerleştirilmiştir. Algılayıcı düğümlerin algıladığı veriler merkezi bir konumda sabit olarak bulunan toplayıcı istasyonda toplanmıştır. Önerdiğimiz tekniğin simülasyon modeli Riverbed Modeler kablosuz haberleşme yazılımı ile tasarlanmıştır. Önerdiğimiz algılayıcı düğüm yerleştirme ve röle düğüm seçimi yaklaşımları sayesinde en az sayıda kablosuz algılayıcı düğüm ile belirli bir alanın izlenmesi sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler-** Algılayıcı Ağlar; Bilişsel Radyo; Bulanık Mantık; IEEE 802.22; Düğüm Yerleştirme.

#### ABSTRACT

In this study, a sensor network structure based on cognitive wireless regional area network (WRAN) technology is proposed. In WRAN technology, a consumer premises equipment (CPE) and a base station communicate opportunistically via fixed channels without causing any harmful interference to existing communication systems. In the network structure, CPEs use the time division multiple access (TDMA) technique to detect environmental data, such as temperature, pressure, etc. and transmit them to the base station. With the help of node placement approach, a large number of sensor nodes are placed in a large area. Additionally, a fuzzy logic-based relay selection approach is proposed to improve network sustainability. To detect environmental parameters, sensor nodes are located to cover the whole area. The values detected by the sensor nodes were collected by the collector station fixed in the center. The simulation model of the proposed approach was implemented using Riverbed

<sup>1</sup>İletişim: [huseyinekici@gmail.com](mailto:huseyinekici@gmail.com) (<https://orcid.org/0009-0003-2892-3325>)

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

<sup>2\*</sup>Sorumlu yazar iletişim: [muhammedbayrakdar@duzce.edu.tr](mailto:muhammedbayrakdar@duzce.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0001-9446-0988>)

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

Modeler software. Thanks to the proposed node placement and relay node selection approaches, a certain area is monitored with a minimum number of wireless sensor nodes.

**Keywords- Sensor Networks; Cognitive Radio; Fuzzy Logic; IEEE 802.22; Node Placement.**

## I. GİRİŞ

Kablosuz algılayıcı ağlar, ortamı sezme yeteneğinden dolayı kablosuz haberleşme alanında en yaygın kullanılan teknolojilerden biridir. Kablosuz algılayıcı ağ, algılayıcı düğümlerin algılama yeteneği sayesinde çevresel izleme açısından insanların hayatını kolaylaştırmaktadır. Algılayıcı düğümler her türlü veriyi otomatik olarak algılar ve toplayıcı istasyon algılanan veriye ilişkin gerekli işlemleri gerçekleştirir. İnsan kontrollü sistemlerle karşılaştırıldığında, güvenlik uygulamalarından çevresel izlemeye kadar her alanda büyük önem taşımaktadır.

IEEE 802.22 bilişsel radyo WRAN teknolojisi, kırsal alanlarda kullanılmayan televizyon kanallarından etkin bir şekilde yararlanmak amacıyla standartlaştırılmıştır. Kırsal alanlarda nüfus yoğunluğunun çok düşük olması nedeniyle herhangi bir spektrum maliyeti olmadan WRAN tabanlı kablosuz algılayıcı ağ kullanılarak çevresel izleme yapılması kaçınılmaz bir fırsattır. Ayrıca, WRAN sabit konum tabanlı bir teknolojidir ve çevresel izlemede algılama düğümleri için hareketlilik gerekli değildir. Ayrıca, sabit lisanslı iletişim WRAN teknolojisinin yardımıyla her türlü zararlı müdahaleden korunmaktadır. WRAN teknolojisinde hem baz istasyonları hem de CPE, televizyon kanallarında sabit lisanslı haberleşmenin varlığını tespit etme yeteneğine sahiptir. Ancak kanal yönetimi kararı sadece baz istasyonu tarafından verildiği için CPE herhangi bir karar vermemektedir.

Kablosuz algılayıcı cihazların fiyatları düşse de, yüzlerce veya binlerce düğüm gerektiren uygulamalar hâlâ yüksek maliyetli olabilmektedir. Bu tür uygulamalarda, algılayıcı düğümlerin yerleşimi büyük önem taşır. Bunun sebebi, kablosuz algılayıcı ağlarda sensör sayısının hem maliyeti hem de sistem performansını doğrudan etkilemesidir. Düğümlerin yerleştirilmesinde, sensör sayısını minimumda tutmak, kapsama alanı ihtiyaçlarını karşılamak ve geniş ağlarda düğümlerin doğru şekilde dağıtımını sağlamak temel gerekliliklerdir.

Algılayıcı düğümler genellikle izlenecek alanın yapısına ve niteliğine bağlı olarak rastgele veya deterministik olarak yerleştirilmektedir. İzlenecek bölgenin özellikleri bilinmiyorsa veya bölgeye ulaşamıyorsa rastgele dağılım kullanılmaktadır. Bölgeye erişim sağlandığında ve bölgenin özellikleri ayrıntılı olarak bilindiğinde, algılayıcı düğümlerin belirli noktalara yerleştirilmesinde deterministik dağıtım yöntemi uygulanabilir.

Makalenin bilimsel katkısı, bilişsel WRAN teknolojisini kullanarak spektrum maliyeti olmadan kırsal alanlarda çevresel izleme için optimize bir algılayıcı ağ yapısı önermesidir. Bulanık mantık tabanlı röle seçimi ve minimum düğüm yerleştirme stratejileri, ağın sürdürülebilirliğini ve enerji verimliliğini artırmıştır. WRAN teknolojisinin yeni uygulama alanlarına yönelik potansiyelini göstermesiyle literatüre yenilikçi bir perspektif sunmaktadır.

Bu çalışmanın katkıları şunlardır: (i) Çevresel izleme için WRAN teknolojisi tabanlı algılayıcı ağ kullanılmıştır. (ii) Kullanılmayan boş televizyon kanallarından herhangi bir spektrum maliyeti olmadan yararlanılmıştır. (iii) Algılayıcı ağı toplam enerji tüketimi minimum seviyeye düşürülmüştür. (iv) Kablosuz algılayıcı ağ modeli, Riverbed Modeler yazılımı ile simüle edilmiştir. (v) Düğüm yerleştirme yöntemleri için matematiksel formüller oluşturulmuştur. (vi) Farklı düğüm yerleştirme yaklaşımlarında ihtiyaç duyulan algılayıcı düğüm sayıları karşılaştırılmıştır.

## II. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

İlgili çalışmalarda, bilişsel kablosuz algılayıcı ağlarda düğüm yerleştirme ile ilgili pek çok araştırma bulunmaktadır. Tay ve Şentürk, algılayıcı ağların enerji tüketimini azaltmak ve ömrünü uzatmak amacıyla yeni bir kümeleme algoritması önermişlerdir [1]. Bu amaç doğrultusunda, geliştirdikleri algoritma, popüler kümeleme algoritmaları LEACH ve PEGASIS'ten daha verimli bir algılayıcı ağ yapısı oluştururken CH seçimine yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. Li ve diğ., titreşim kontrol problemini çözmek için eyleyicilerin ve sensörlerin yerleşim optimizasyonu yöntemlerini ve merkezi olmayan uyarlanabilir bulanık kontrol yöntemlerini sunmuşlardır [2]. Ayrıca, denklemler oluşturarak kontrol yöntemlerine bağlı olmayan optimizasyon kriterleri önermişlerdir. Leitold ve diğ., dinamik sistemlere ek sensörler atamak için kümeleme benzetimi tabanlı metodoloji önermişlerdir [3]. Önerilen metodoloji sayesinde sistemin gözlemlenmesi basitleştirilmektedir. Zhang ve diğ., yeni bir sensör yerleştirme stratejisi geliştirmişlerdir [4]. Stratejinin ana özelliği, uzaysal dağılımın temel özelliklerinden yararlanarak sensörleri konumlandırmaktır.

Francés-Chust ve diğ., düğüm yerleşiminin nereye kurulacağı kısmını şu unsurlar aracılığıyla ele almışlardır: düğümlerin sızıntıya karşı hassasiyeti, bilgilerin belirsizliği ve koşullu entropi maksimizasyonu [5]. Düğümler arasındaki karşılıklı etkiyi görmek için bir ağdaki aday sensörler arasındaki ilişkileri değerlendirmişlerdir. Peng ve diğ., yerleştirme değerlendirilmesini, çok kriterli grup karar verme konusu olarak formüle ederek yeni bir algoritma sunmuşlardır [6]. Ardından bulanık kümesi ve küme çifti analizi kavramlarını doğrudan ve dolaylı olarak sunmuşlardır. Somesula ve diğ., kullanıcı hareketliliğinden ve kullanıcı etkileşim süresinin rastgeleliğinden yararlanan sisteme ele almışlardır [7]. İşbirliğine dayalı bir önbellekleme probleminde, kullanıcı cihazlarının çeşitli hızlarda hareket ettiği gerçekçi bir senaryoyu incelemişlerdir. Irid ve diğ., Gauss karışımı yarı tanımlı programlama adı verilen bir yerleştirme algoritmasının geliştirilmiş halini sunmuşlardır [8]. Geliştirdikleri algoritma, maksimum olabilirlik konum tahmincisini elde etmek için alınan sinyal gücü değerini kullanmaktadır.

Zahedi ve diğ., sanal ağlarda uygun çözüm kalitesi-hız dengesini sağlamak için bulanık mantık ve genetik algoritmaya dayalı birleşik bir model önermişlerdir [9]. Bu yöntemde, çevrimiçi yerleştirme ve yönlendirme için çok kriterli bulanık çıkarım sistemi kullanmışlardır. Emami ve diğ., bulanık ortalamalar ve aritmetik optimizasyon algoritmasını temel alan hibrit bir yerleştirme yöntemi sunmuşlardır [10]. Bu yöntem, her iki algoritmanın da avantajlarından tam olarak yararlanan çok modlu ve popülasyon tabanlı yinelemeli bir algoritmadır. Sun ve Qu, doğrusal optimizasyon bulanık ortalamaları ve yapay sinir ağlarını kullanan etkili bir fotodedektör yerleştirme yöntemi önermişlerdir [11]. Bu yöntemde, çalışma yüzeyi fotodedektör düzeni için doğrusal optimizasyon kullanılırken, verileri filtrelemek için bulanık ortalamalar yöntemi kullanılmıştır.

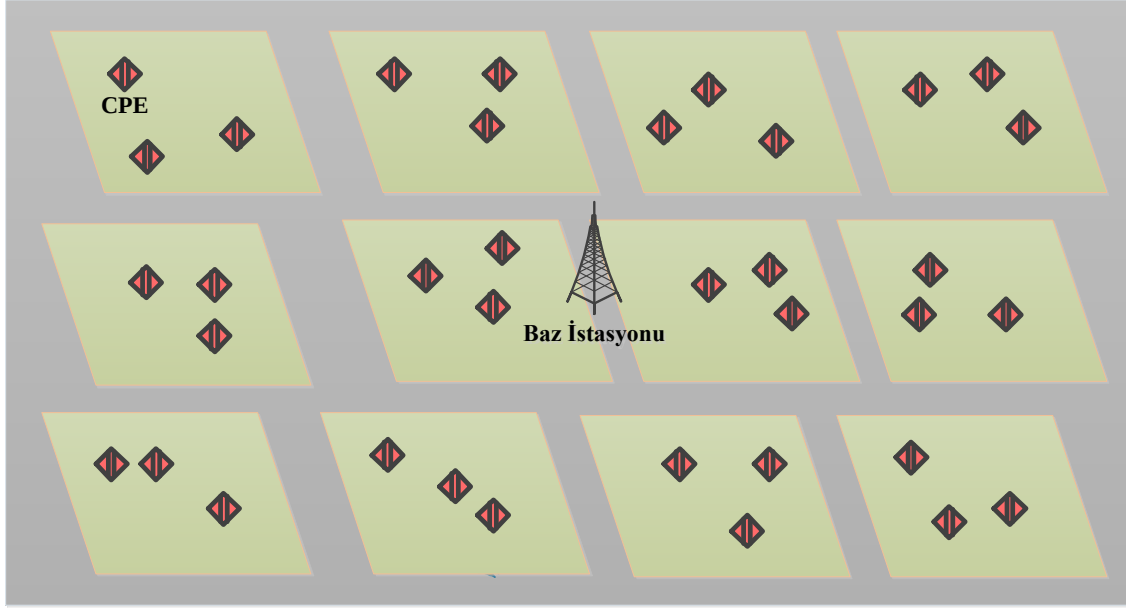
IEEE 802.22 bilişsel radyo kablosuz bölgesel alan ağı ile ilgili sınırlı sayıda makale bulunmaktadır. Shan ve diğ., paket düşme olasılığı, algılama gecikmesi ve toplam verim gibi temel QoS kısıtlamaları altında DA-WRAN'ın enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan bir sistem önermişlerdir [12]. Önerdikleri sistemde, sinyal geri kazanımının doğruluğu ifadesi üstel fonksiyona oturtulmuş ve ilk kez enerji verimliliği optimizasyonu sırasında sıkıştırılmış numune sayısı dikkate alınmıştır. Stevenson ve diğ. bilişsel kablosuz bölgesel alan ağları için IEEE 802.22 standardına üst düzey bir genel bakış sunmuştur [13]. Ko ve diğ. IEEE 802.22 standardının bilişsel radyo işlevselliğini ayrıntılı olarak sunmuş ve kanal algılama, kanal sınıflandırma ve kanal bilgilerinin bakımını kullanarak dinamik kanal yönetimi ile bilişsel işlevselliği sağlamıştır [14].

Ukpong ve diğ. bilişsel radyo ağlarda spektrum paylaşımını geliştirmek için derin takviyeli öğrenme yöntemlerinin kullanımını değerlendirmişlerdir [15]. Bino ve Mohan bilişsel radyo tabanlı IEEE 802.22 WRAN ağlar için dinamik kooperatif spektrum algılama tekniği geliştirmişlerdir [16]. Jain ve diğ. IEEE 802.22 WRAN'da Rayleigh çoklu yol sönmüleme kanalı altında yapay sinir ağı tabanlı kooperatif spektrum algılama tekniği önermişlerdir [17].

Literatürdeki çalışmalar, IEEE 802.22 tabanlı bilişsel kablosuz algılayıcı ağlarda en uygun düğüm yerleştirme yaklaşımını ve röle düğüm seçimi için bulanık mantık sistemini dikkate almamaktadır.

### III. IEEE 802.22 STANDARTININ TASARIMI

Bu makalede, çevresel izleme için televizyon frekanslarındaki beyaz alanların fırsatçı bir şekilde kullanılması amacıyla bilişsel radyo tabanlı WRAN teknolojisi ele alınmıştır. WRAN teknolojisinin yardımıyla sabit cihazların spektrumundan hiçbir maliyet olmadan yararlanılmıştır. WRAN teknolojisindeki baz istasyonlarının bilişsel radyo yeteneği sayesinde CPE'ler, sabit operasyonlara müdahale etmemişlerdir.

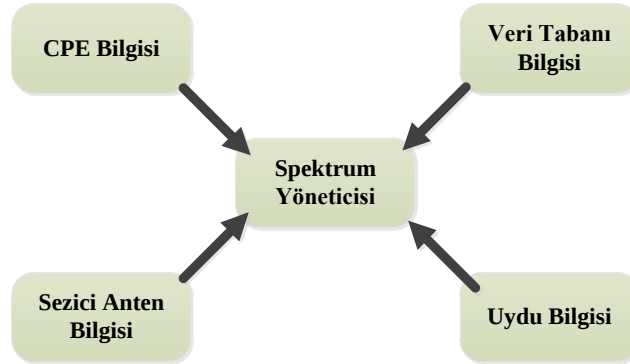


Şekil 1. IEEE 802.22 WRAN ağ yapısı

Şekil 1’de, bilişsel radyo WRAN ortamı gösterilmektedir. Ağ ortamında, baz istasyonu ve 36 adet CPE bulunmaktadır. Sabit CPE düğümlerinin görevleri, spektrumdaki mevcut işlemleri tespit etmek, mevcut işlemleri baz istasyonuna raporlamak, yedek kanal listesini tutmak ve sıcaklık, nem, basınç gibi gerekli çevresel verileri algılamaktır. WRAN teknolojisi, baz istasyonu, 255 sabit CPE’ye hizmet vermektedir ve yarıçapı maksimum 30 km olan kırsal bir alanı kapsamaktadır. Baz istasyonunun görevleri, CPE’ler arasındaki iletişimi kontrol etmek, spektrumdaki sabit operasyonları tespit etmek, kanal yönetimi kararları vermek, mevcut konum için sabit veri tabanlarının bilgisini edinmek, mevcut kanalları talep etmek, çoklu yedekleme kanallarını tutmak ve CPE’ler tarafından algılanan çevresel verileri toplamaktır.

#### A. Spektrum Yönetimi

Baz istasyonunun spektrum yöneticisi, yararlanılacak televizyon beyaz alan spektrumuna karar vermek için bilişsel radyo fonksiyonuna sahiptir. Spektrum yöneticisi, baz istasyonunun ortam erişim kontrolü alt katmanında bulunur.

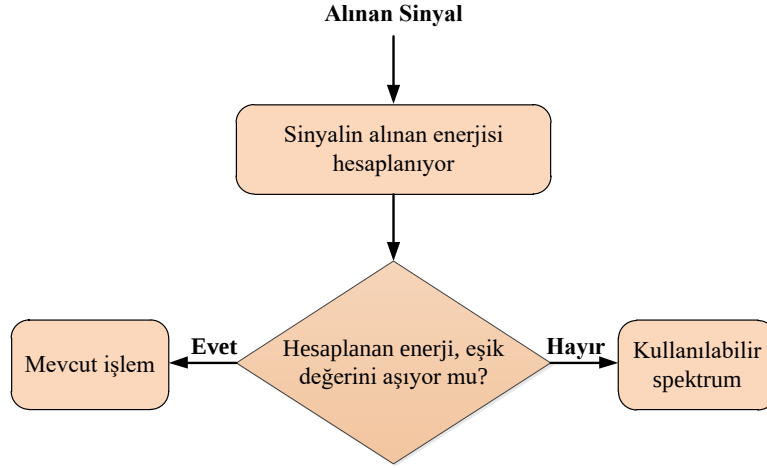


Şekil 2. Baz istasyonu spektrum yöneticisi

Şekil 2’de, spektrum yöneticisi modeli gösterilmektedir. Spektrum yöneticisinin temel görevi CPE, veri tabanı, sezici anten ve uydu bilgilerine göre kanal yönetimi kararlarını vermektir. CPE, spektrum yöneticisini spektrumdaki sabit operasyonlar hakkında bilgilendirmektedir. Spektrum yöneticisi, kanal yönetimi kararını verirken mevcut veri tabanı bilgilerini dikkate almaktadır. Spektrum yöneticisi, spektrum algılama fonksiyonuna göre kendi baz istasyonunun algılama anten bilgilerini elde etmektedir. Uydu bilgileri, coğrafi konumu dikkate alarak mevcut konumu belirlemek amacıyla spektrum yöneticisi tarafından alınmaktadır. Spektrum yöneticisi ilgili birimlerden gelen tüm bilgileri değerlendirerek kanalların durumuna karar vermektedir.

### B. Spektrum Sezme Mekanizması

Spektrum sezme mekanizması, lisanslı spektrumu gözlemlemek ve gözlemlenen lisanslı spektrumun sabit operasyonlar tarafından kullanılıp kullanılmadığını belirlemek için kullanılmaktadır. Hem baz istasyonları hem de CPE'ler, WRAN teknolojisinde televizyon beyaz alan spektrumunu tespit etmek için spektrum sezme özelliğine sahiptir. Algılama mekanizması temel olarak dört parametreye dayanmaktadır; (i) algılama alıcısı hassasiyeti, (ii) kanal algılama süresi, (iii) algılama olasılığı ve (iv) yanlış alarm olasılığı. Alıcı duyarlılığının algılanması, beklenen bit hata oranının elde edilmesiyle ilgilidir. WRAN teknolojisinde kanal tespit süresine göre spektrum periyodik olarak tespit edilmektedir. Tespit olasılığı, spektrumda mevcut bir işlemin doğru şekilde tespit edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Yanlış alarm olasılığı, spektrumda gerçekte herhangi bir mevcut işlem yokken, spektrumda mevcut bir işlemin yanlış algılanması olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3. Spektrum kullanılabilirlik tespiti

Enerji tespit tekniği, düşük karmaşıklığı nedeniyle bu çalışmada spektrum algılama mekanizması olarak kullanılmıştır. Şekil 3'te, enerji algılama tekniğinin akış şeması gösterilmektedir. Enerji tespit tekniğinde, belirli bir spektrumdaki sinyalin alınan enerjisi hesaplanmaktadır. Hesaplanan enerji önceden tanımlanmış bir eşik değeriyle karşılaştırılmaktadır. Alınan enerjinin eşik değerini aşması spektrumda mevcut işlemin var olduğu anlamına gelmektedir. Alınan enerji eşik değerini aşmıyorsa spektrumun fırsatçı kullanıma uygun olduğu anlamına gelmektedir.

### C. Kanal Sınıflandırma

Spektrum yöneticisi, spektrum algılama sonuçlarına bağlı olarak televizyon kanallarını kullanılabilir ve kullanılamaz olarak sınıflandırmaktadır. Belirli bir konumdaki mevcut kanallar, mevcut veri tabanlarına göre belirlenmektedir. Herhangi bir yerleşik veri tabanı bilgisi yoksa tüm kanallar kullanılabilir olarak kabul edilmektedir. Mevcut kanallar şu şekilde sınıflandırılmıştır; korunan, sınıflandırılmamış, izin verilmeyen, çalışan, yedeklenen, aday.



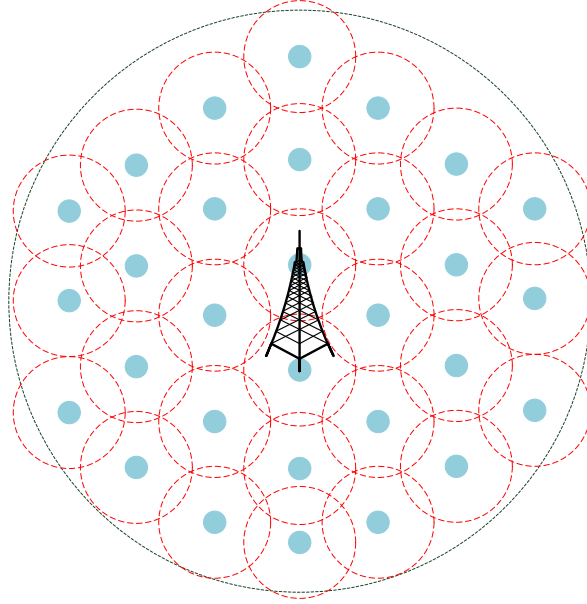
Şekil 4. Kanal sınıflandırma

Şekil 4'te, yerleşik veri tabanı bilgisinin olmaması durumunda mevcut kanalların sınıflandırılması gösterilmektedir. Korunan kanallar algılama yardımıyla tespit edilmektedir ve aday kanal olmaya yatkındırlar. Sınıflandırılmamış kanallar gecikme nedeniyle algılanamaz ancak algılandıktan sonra korunan veya aday olarak

yeniden sınıflandırılabilirler. İzin verilmeyen kanallar düzenleyici kısıtlamalara göre belirlenmektedir. Çalışan kanal, baz istasyonu ile CPE arasındaki mevcut işletim kanalı olarak tanımlanmaktadır. Kanal değiştirmenin gerekli olduğu durumlarda yedeklenen kanallara ihtiyaç duyulmaktadır. Aday kanallar yedeklenen kanal olma konusunda potansiyele sahiptir.

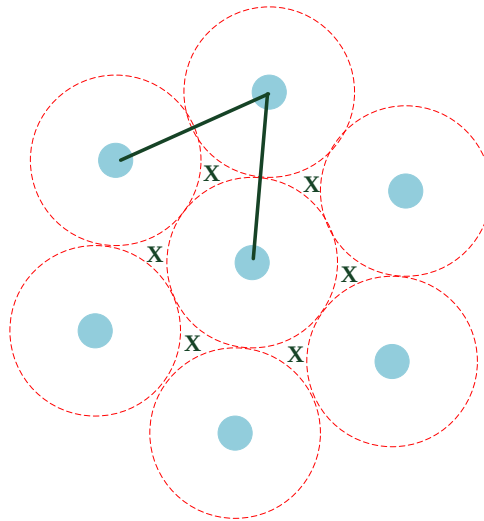
#### IV. IEEE 802.22 TABANLI DÜĞÜM YERLEŞTİRME YAKLAŞIMI

Bilişsel kablosuz algılayıcı ağlarda düğüm yerleştirme için iki farklı yöntem mevcuttur. İlk yöntem, düğümlerin belirli bir alana rastgele dağıtıldığı rastgele yerleştirme yaklaşımıdır. İkinci yöntem ise algılayıcı düğümlerin, hedef bölgeyi tamamen kapsayacak şekilde yerleştirildiği kapsama temelli yerleştirme yaklaşımıdır. Bu çalışmada, çevresel izleme amacıyla kapsama odaklı yeni bir yerleştirme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 5. Kapsama alanına göre yerleştirme işlemi

Şekil 5'te, kapsama odaklı düğüm yerleştirme için oluşturulan simülasyon senaryosu gösterilmektedir. Bu senaryo, birçok algılayıcı düğüm ile bir toplayıcı istasyondan oluşmaktadır. Kablosuz sensör düğümler çevrelerindeki verileri algılayarak toplayıcı istasyona iletilmek üzere röle düğüme göndermektedirler. Toplayıcı istasyon tüm röle düğümlerden gelen verileri toplamaktadır.



Şekil 6. Algılayıcı düğümler arası mesafe

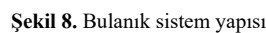
```

graph TD
    A[Düğüm Yerleşimi] --> B[Başla]
    B --> C[Alanı belirle]
    C --> D[Toplam algılayıcı düğüm sayısını hesapla]
    D --> E[Algılayıcı düğümlerin konumlarını belirle]
    E --> F[Algılayıcı düğümleri belirlenen konumlara yerleştir]
    F --> G{Tüm algılayıcı düğümler yerleşti mi?}
    G -- Evet --> H[Yerleştirme tamamlandı]
    G -- Hayır --> F
    H --> I[Mevcut röle düğüm aktif durumda]
    I --> J{Röle düğümün ömrü bitti mi?}
    J -- Hayır --> I
    J -- Evet --> K[Tüm algılayıcı düğümlerin ömrü bitti mi?]
    K -- Evet --> L[Son]
    K -- Hayır --> M[Bulanık mantık sistem giriş parametrelerini tüm algılayıcı düğümler için değerlendir]
    M --> N[Bulanık mantık sistemi çıkış değerini bul]
    N --> O[Bulanık mantık sistemine göre röle düğümü belirle]
    O --> I

```

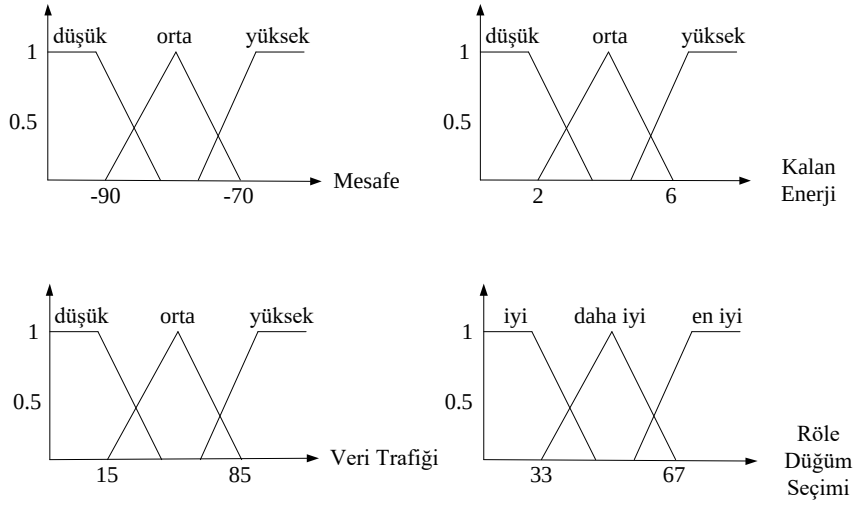
Önerilen yaklaşımın akış şeması Şekil 7’de verilmiştir. Önerilen düğüm yerleştirme yönteminin avantajları şunlardır: Tüm bölge, neredeyse kesintisiz bir şekilde izlenebilir hale gelmektedir. Ayrıca, mümkün olan en az sayıda algılayıcı düğüm kullanılmaktadır. Tüm alanın kapsandığı yaklaşıma göre yapılan yerleşimdeki kesişim bölgeleri ortadan kaldırılmıştır. Düğüm yerleşim işlemi başlarken, alan belirlenerek toplam algılayıcı düğüm sayısı hesaplanmaktadır. Algılayıcı düğümlerin konumları belirlenmektedir. Algılayıcı düğümler belirlenen konumlara yerleştirilerek, tüm algılayıcı düğümlerin yerleştirilip yerleştirilmediği kontrol edilmektedir. Yerleştirme işlemi tamamlandıysa mevcut röle düğüm aktif duruma gelmektedir. Röle düğümün ömrünün bitip bitmediği kontrol edilmektedir. Bu kontrol esnasında, tüm algılayıcı düğümlerin ömrü bittiyse akış şeması sonlanmaktadır. Sonrasında, tüm algılayıcı düğümler için bulanık mantık sistemi giriş parametreleri değerlendirilmektedir. Bulanık mantık sistemi çıkış değerleri bulunarak röle düğüm belirlenmektedir.

Bulanık mantık tabanlı röle düğüm seçimi için Mamdani bulanık çıkarım sistemi kullanılmaktadır. Mesafe, kalan enerji ve veri trafiği parametreleri giriş olarak belirlenmiştir.





Şekil 8’de, en iyi röle düğümünün seçilmesi için bulanık mantık tabanlı sistem kullanılmıştır. Bulanık mantık sisteminde tüm algılayıcı düğümler arasından en uygun röle düğümünün seçilebilmesi için mesafe, kalan enerji ve veri trafiği giriş parametreleri kullanılmıştır.



Şekil 9. Giriş ve çıkış parametreleri

Şekil 9’da, bulanık mantık sisteminin giriş parametreleri ve çıkış parametresi gösterilmektedir. Mesafe, kalan enerji ve veri trafiği giriş parametreleri iken röle düğüm seçimi çıkış parametresidir. Her bir parametre için seviyeler ve değerler tanımlanmıştır. Bulanık mantık sisteminin kuralları da parametrelere göre belirlenmiştir. Mesafe için, düşük, orta ve yüksek seviyeleri belirlenmiştir. Orta seviyesinin değerleri -90 ve -70 arasında değişmektedir. Kalan enerji için düşük, orta ve yüksek seviyeleri belirlenmiştir. Orta seviyesinin değerleri 2 ve 6 arasında değişmektedir. Veri trafiği için düşük, orta ve yüksek seviyeleri belirlenmiştir. Orta seviyesinin değerleri 15 ve 85 arasında değişmektedir. Röle düğüm seçimi için iyi, daha iyi ve en iyi seviyeleri belirlenmiştir. Daha iyi seviyesinin değerleri 33 ve 67 arasında değişmektedir. Mesafenin birimi dBm, kalan enerjinin birimi j, veri trafiğinin birimi % ve röle düğüm seçiminin birimi %’dir.

### B. Benzetim Ortamının Tasarımı

Riverbed Modeler benzetim yazılımı bilişsel kablosuz algılayıcı ağ düğüm yerleştirme işlemleri için kullanılmıştır [18]. Simülasyon modelinde algılayıcı düğümler için kullanılan parametreler ve bunlara ait değerler Tablo 1’de sunulmuştur. Riverbed Modeler, bilişsel kablosuz algılayıcı ağların modellenmesine yönelik kapsamlı bir simülasyon geliştirme platformu olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmanın benzetim ortamını tasarlarken, Riverbed Modeler ile doğrudan hazır modüller kullanılmasının yanında kod yazılarak geliştirme yapılan kısımlar da olmuştur. Modelin performansı, ayrıklı olay simülasyonları ile değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Benzetim ortamı parametreleri

| Parametre                    | Değer                        |
|------------------------------|------------------------------|
| Benzetim süresi              | 3600 s                       |
| Ortam erişim tekniği         | CSMA                         |
| Ortalama anten kazancı       | 2 dB                         |
| Yol kaybı modeli (katsayısı) | Serbest uzay yol kaybı (3,7) |
| Varyans                      | 13,6 dB                      |
| Kullanılan frekans           | 2,4 Ghz                      |
| Standart sapma               | 6,4 dB                       |
| Ortalama kapsama alanı       | ~ 5 m <sup>2</sup>           |
| Ortalama gecikme             | 5000 ms                      |
| Ortalama iletim gücü         | 0,02 W                       |
| Modülasyon tekniği           | BPSK                         |
| Ortalama veri oranı          | 1 Mbps                       |



### C. Bulgular

Tablo 2’de bulanık mantık sisteminin çıktıları görülmektedir. Mesafe, kalan enerji ve veri trafiği parametrelerinin değerlerine göre röle düğüm seçimi verilmiştir. Örnek olarak, mesafe -95 dBm, kalan enerji 6,5 j ve veri trafiği %9 olduğunda en iyi röle düğüm seçimi yapılmaktadır.

Tablo 2. Bulanık mantık sistemi çıktıları

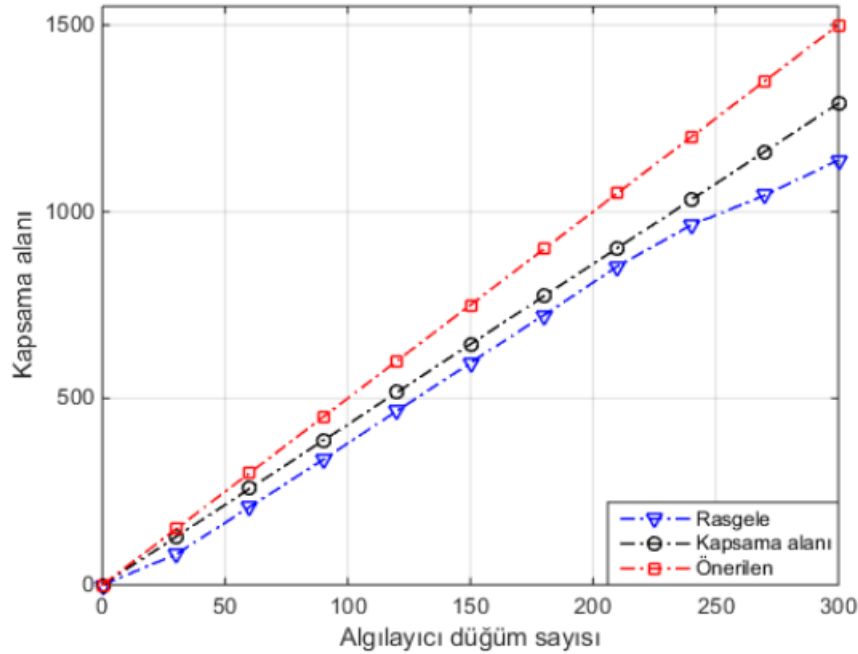
| Mesafe   | Kalan enerji | Veri Trafiği | Röle düğüm seçimi |
|----------|--------------|--------------|-------------------|
| - 66 dBm | 1,6 j        | 93 %         | iyi               |
| - 95 dBm | 6,5 j        | 9 %          | en iyi            |
| - 83 dBm | 4,7 j        | 57 %         | daha iyi          |

Algılayıcı düğüm yerleştirme yönteminin performansını değerlendirmek amacıyla, enerji tüketimi, sensör düğüm sayısı, simülasyon süresi, kapsama alanı ve mesafe gibi parametreler grafiklerle sunulmuştur.

Tablo 3. Farklı yöntemlere göre düğüm sayıları

| Yöntem        | 500 m <sup>2</sup> için gereken düğüm sayısı | 750 m <sup>2</sup> için gereken düğüm sayısı |
|---------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Önerilen      | 100                                          | 150                                          |
| Rasgele       | 128                                          | 186                                          |
| Kapsama alanı | 116                                          | 174                                          |

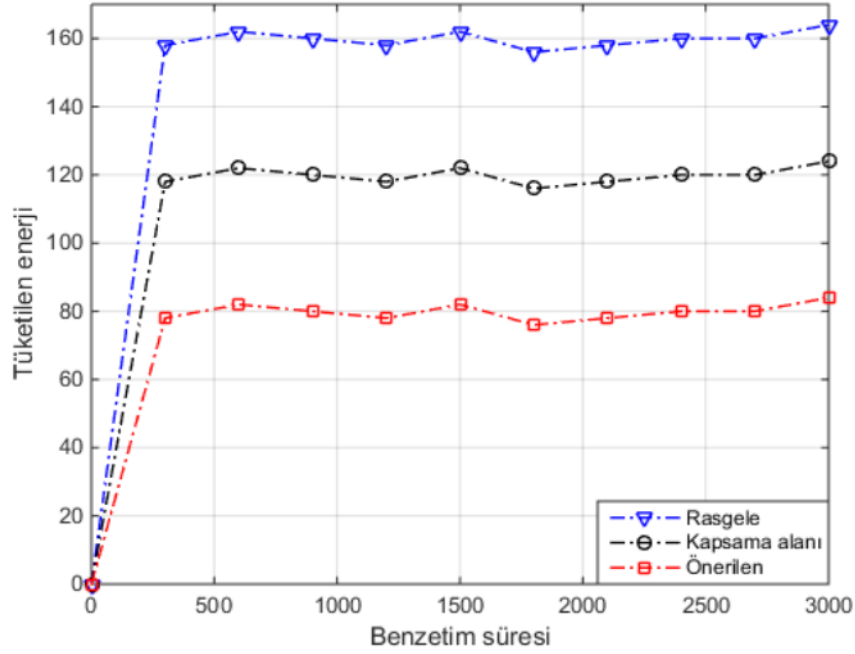
Tablo 3’te, farklı yöntemler için belirli bir alanı kapsamak amacıyla gereken toplam sensör düğüm sayısı karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur. Bu çalışmada önerdiğimiz yöntemin en düşük sayı ile en uygun yöntem olduğu gösterilmiştir.



Şekil 10. Kapsama alanı

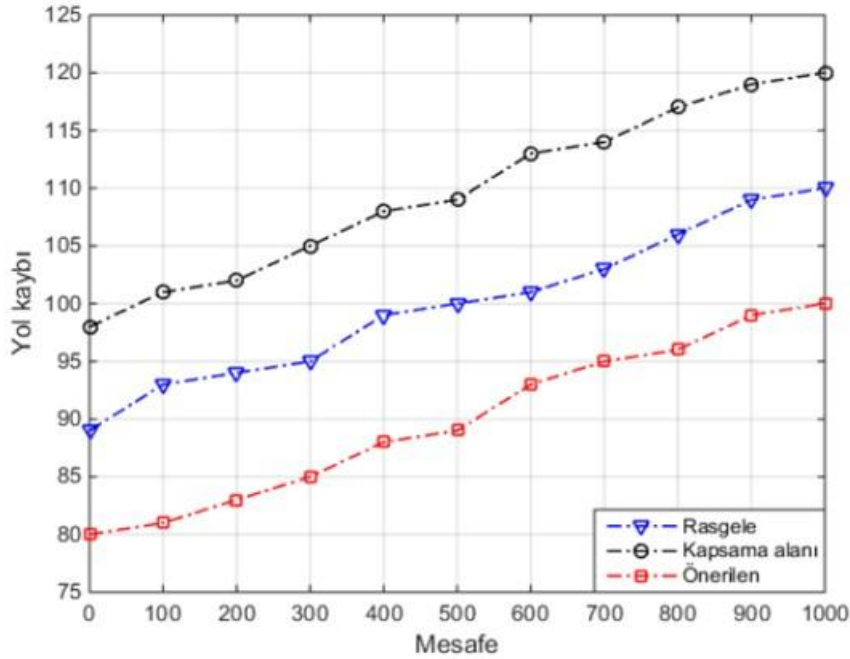
Şekil 10’da, kapsama alanı sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Önerilen yöntemin en fazla alanı kapsadığı net bir şekilde görülmektedir. Kapsama alanı 0 ile 1500 m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Algılayıcı düğüm sayısı ise 0 ile 300 arasında değişmektedir. Örnek olarak, kapsama alanı 1000 m<sup>2</sup> iken, önerilen yaklaşıma göre

200 düğüm, kapsama alanı yaklaşımına göre 225'ten fazla düğüm ve rasgele yaklaşıma göre 250 civarı düğüm kullanılması gerekmektedir.



Şekil 11. Enerji

Şekil 11’de, tüketilen enerji sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Önerilen yöntemin en az enerji tükettiği net bir şekilde görülmektedir. Tüketilen enerji, 0 ile 160 j arasında değişmektedir. Benzetim süresi, 0 ile 3000 s arasında değişmektedir. Benzetim süresi 0 ile 250 s arasında iken, tüm yaklaşımlar için tüketilen enerji artmaktadır, sonrasında belirli seviyelerde yaklaşık sabit kalmaktadır. Örnek olarak, benzetim süresi 1500 s olduğunda, rasgele yaklaşımda 160 j civarı enerji tüketilmektedir, kapsama alanına göre yaklaşımda 120 j civarı enerji tüketilmektedir ve önerilen yaklaşıma göre 80 j civarı enerji tüketilmektedir.



Şekil 12. Mesafe

Şekil 12’de, yol kaybına göre mesafe sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Önerilen yöntemin mesafeye göre en az yol kaybına sahip olduğu net bir şekilde görülmektedir. Yol kaybı, 75 ile 125 dB arasında değişmektedir. Mesafe, 0 ile 1000 m arasında değişmektedir. Örnek olarak, mesafe 700 m iken, önerilen yaklaşıma göre yol kaybı 95 dB civarındadır, rasgele yaklaşıma göre 105 dB civarındadır ve kapsama alanı yaklaşımına göre 115 dB civarındadır.

IEEE 802.22 teknolojisi, herhangi bir spektrum maliyeti olmadan, bilişsel özellikler yardımıyla kırsal alanlardaki lisanslı kanallara fırsatçı erişim sağlamaktadır. Kablosuz algılayıcı ağlar, tüm dünyada veri izleme amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. İzleme sistemlerinin kurulum aşamasındaki düğüm yerleştirme işlemlerinin ve röle düğüm seçim işlemlerinin sağlıklı bir şekilde yapılması büyük önem taşımaktadır.

## V. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada, herhangi bir spektrum maliyeti olmadan sabit kanalların kullanıldığı bilişsel WRAN teknolojisi tabanlı bir algılayıcı ağ yapısı önerilmiştir. Ağ yapısında, CPE’ler çevresel verileri algılamak için TDMA tekniğini kullanmıştır. Önerilen ağın geçerliliği ve uygulanabilirliği grafiksel sonuçlarla kanıtlanmıştır. Önerilen ağ, kırsal alanlarda herhangi bir spektrum maliyeti olmaksızın kablosuz iletişim olanağı sağlamıştır. Düğümler ve toplayıcı istasyonun kapsama alanı göz önünde bulundurularak, belirli bir bölgenin algılanması için en az sayıda algılayıcı düğüm kullanılmıştır. İstenilen parametrelerin algılanması için algılayıcı düğümler tüm alanı kapsayacak şekilde yerleştirilmiştir. En uygun röle düğümlerini seçmek için bulanık mantık tabanlı yaklaşım kullanılmıştır. Mevcut röle düğümünün ömrü dolduğunda, bulanık mantık sistemi kullanılarak yeni bir röle düğümü seçimi yapılmıştır. Önerilen kablosuz algılayıcı ağ modeli, Riverbed Modeler yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Önerilen düğüm yerleştirme yaklaşımı sayesinde, belirli bir kırsal alan en az sayıda kablosuz sensör düğüm ile tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Tay, M., Senturk, A. (2022). New energy-aware cluster head selection algorithm for wireless sensor networks. *Wireless Pers Commun.*, 122, 2235-2251.
- [2] Li, D., Liu, W., Jiang, J. (2011). Placement optimization of actuator and sensor and decentralized adaptive fuzzy vibration control for large space intelligent truss structure. *Sci. China Technol. Sci.*, 54, 853-861.
- [3] Leitold, D., Vathy-Fogarassy, A., Abonyi, J. (2018). Network distance-based simulated annealing and fuzzy clustering for sensor placement ensuring observability and minimal relative degree, *Sensors*, 18(9), 3096.
- [4] Zhang, X. X., Li, H. X., Qi, C. K. (2010). Spatially constrained fuzzy-clustering-based sensor placement for spatiotemporal fuzzy-control system, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 18(5), 946-957.
- [5] Francés-Chust, J., Brentan, B. M., Carpitella, S., Izquierdo, J., Montalvo, I. (2020). Optimal placement of pressure sensors using fuzzy DEMATEL-based sensor influence, *Water*, 12(2), 493.
- [6] Peng, X., Garg, H., Luo, Z. (2023). When content-centric networking meets multi-criteria group decision-making: Optimal cache placement policy achieved by MARCOS with q-rung orthopair fuzzy set pair analysis, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 123(A), 106231.
- [7] Somesula, M. K., Kotte, A., Annadanam, S. C. (2022). Deadline-aware cache placement scheme using fuzzy reinforcement learning in device-to-device mobile edge networks, *Mobile Netw Appl.*, 27, 2100-2117.
- [8] Irid, S. M. H., Hadjila, M., Hachemi, M. H., Souiki, S., Mosteghanemi, R., Mostefai, C. (2023). Node localization based on anchor placement using fuzzy c-means in a wireless sensor network, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 69(1), 99-104.
- [9] Zahedi, S. R., Jamali, S., Bayat, P. (2022). EmcFIS: evolutionary multi-criteria fuzzy inference system for virtual network function placement and routing, *Appl. Soft Comput.*, 117, 108427.
- [10] Emami, H., Pashazadeh, S., Balafar, M. A. (2023). A novel fuzzy-based algorithm for ONU placement in FiWi broadband access network, *Opt. Fiber Technol.*, 80, 103414.
- [11] Sun, K., Qu, J. (2023). Efficient photodetector placement using linear optimization fuzzy c-means and artificial neural networks, *Journal of Electronics & Information Technology*, 45(5), 1766-1773.
- [12] Shan, B., Li, X., Ji, H., Li, Y. (2017). A QoS-aware green cooperative compressed sensing scheme in IEEE 802.22 WRAN, *Int. J. Commun. Syst.*, 30, e2890.
- [13] Stevenson, C. R., Chouinard, G., Lei, Z., Hu, W., Shellhammer, S. J., Caldwell, W. (2009). IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard, *IEEE Commun. Mag.*, 47(1), 130-138.
- [14] Ko, G., Franklin, A. A., You, S. J., Pak, J. S., Song, M. S., Kim, C. J. (2010). Channel management in IEEE 802.22 WRAN systems, *IEEE Commun. Mag.*, 48(9), 88-94.
- [15] Ukpong, U., Idowu-Bismark, O., Adetiba, E., Dare, O., Owolabi, E., Kala, R. J. (2024). *Deep reinforcement learning applications for coexistence in television whitespace: A mini-review*, International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG), Omu-Aran, Nigeria, 1-9.

- [16] Bino, J., Mohan, P. (2024). Analysis of dynamic cooperative spectrum sensing mechanism in IEEE 802.22 WRAN, *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 77, 390-398.
- [17] Jain S. et al. (2024). Artificial neural network based spectrum sensing in wireless regional area network, *IEEE Access*, 12, 48941-48950.
- [18] Riverbed Modeler, Benzetim Yazılımı, <https://www.riverbed.com/>, Yayın Tarihi. Aralık, 2022. Erişim Tarihi. Aralık, 2023.