



## ELEKTROMANYETİK DALGALARDAN ENERJİ HASAT ETME TEKNIĞİNE DAYALI İKİ CİHAZA SAHİP ÇİFT YÖNLÜ SİMBİYOTİK AĞ İÇİN KAYNAK TAHSİSİ

Muhammed Yusuf ONAY<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Hitit University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 19030, Çorum, Türkiye

**Özet:** Altıncı nesil (6G) teknolojisine yön verme potansiyeline sahip nesnelere interneti (IoT) ağlarının en önemli sorunu cihazların pil ömrüdür. Gelecek nesil haberleşme sistemlerinde kullanılacak milyarlarca IoT cihazının pillerini sık sık değiştirmek veya şarj etmek, hem maliyetli hem de zahmetli olduğundan uygulama açısından pratik değildir. Ayrıca bu durum, yüksek bit hızında düşük enerji ve düşük gecikme süresine sahip haberleşme protokolü kurma hedefinden de çok uzaktır. Bu makalede, mevcut sorunun üstesinden gelmek ve bit hızını artırmak için elektromanyetik dalgalardan enerji hasat etme tekniğine dayalı iki kablosuz cihaza sahip çift yönlü simbiyotik bir ağ önerilmiştir. Zaman ve güç açısından cihazlara kaynak tahsisinin yapıldığı bu çalışmada iki farklı senaryo düşünülmüştür. İşbirliksiz senaryoda kablosuz cihazlar kendi haberleşme hedefine ulaşmaya çalışırken, işbirlikli senaryoda ise cihazlar simbiyotik bir ilişki içinde bilgi aktarımını gerçekleştirmektedirler. Önerilen sistemde çift yönlü güç istasyonu (FDPS), iki antene sahip olup hem verici hem alıcı görevi görmektedir. Kablosuz cihazlar tipik sinyal iletimi yapma yeteneğine sahip olmanın yanında, anten yük empedansının değiştirilip anten yansıma katsayısının ayarlanarak bit dizisini elektromanyetik dalga türü olan radyo frekans dalga formlarına eşleme yöntemiyle geri saçılım haberleşme de yapabilmektedir. Kablosuz cihazların hasat ettiği enerjinin miktarına göre çalışma durumlarının belirlendiği bu modelde, matematiksel analizler yapılmış ve her iki model için sistemin objektif fonksiyonu elde edilmiştir. Daha sonra güç ve zaman parametreleri üzerinden kaynak tahsisi yapılarak bit hızı maksimize edilmiştir. Simülasyon sonuçlarında, farklı parametreler üzerinden sistem performansı test edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, FDPS'nin sinyal gücünün düşük olması, uzak cihazın iletişimini ciddi manada etkilemektedir. Ayrıca sistemi çok yüksek frekanslarda kullanmak performansta bir miktar düşüşe sebep olmuştur. Son olarak, işbirlikli senaryonun işbirliksiz senaryoya göre sistem parametrelerinden daha az etkilendiği ve performans açısından daha üstün olduğu grafiksel sonuçlarda gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** 6G teknolojisi, Simbiyotik ağ, Enerji hasadı, Anten yansıma katsayısı, Nesnelere interneti, Elektromanyetik dalgalar

### Resource Allocation for a Full-Duplex Symbiotic Network with two Devices based on the Technique of Harvesting Energy from Electromagnetic Waves

**Abstract:** The most important problem of IoT networks, which have the potential to drive 6G technology, is the battery life of devices. Frequently changing or charging the batteries of billions of IoT devices that can be used in next-generation communication systems is both costly and inconvenient, making it impractical. Moreover, this is far from the goal of establishing a low energy and low latency communication protocol with high bit rate. In this paper, a full-duplex symbiotic network with two devices based on the technique of harvesting energy from electromagnetic waves is proposed to overcome the existing problem and increase the bit rate. Two different scenarios are considered in this work where resource allocation is determined in terms of time and power. In the non-cooperative scenario, the wireless devices try to reach their own communication destination, while in the cooperative scenario, the devices transfer information in a symbiotic relationship. In the proposed system, the full-duplex power station (FDPS) has two antennas and acts as both a transmitter and a receiver. Wireless devices are not only capable of transmitting a typical signal, but also capable of backscatter communication, which is a method of mapping the bit sequence to radio frequency waveforms, which are a type of electromagnetic wave by changing the antenna load impedance and adjusting the antenna reflection coefficient. In this model, where the operating states of wireless devices are determined according to the amount of energy they harvest, mathematical analysis is performed and the objective function of the system is obtained for both models. Then, the bit rate is maximized by allocating resources over power and time parameters. In the simulation results, the system performance is tested over different parameters. According to the findings, the low signal power of the FDPS seriously affects the communication of the remote device. In addition, using the system at very high frequencies caused some degradation in performance. Finally, the graphical results show that the cooperative scenario is less affected by the system parameters than the non-cooperative scenario and is superior in terms of performance.

**Keywords:** 6G technology, Symbiotic network, Energy harvesting, Antenna reflection coefficient, Internet of things, Electromagnetic waves

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Hitit University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 19030, Çorum, Türkiye

E mail: muhammedyusufonay@hitit.edu.tr (M. Y. ONAY)

Muhammed Yusuf ONAY <https://orcid.org/0000-0002-4984-5421>

Gönderi: 16 Ekim 2024

Kabul: 07 Kasım 2024

Yayınlanma: 15 Kasım 2024

Received: October 16, 2024

Accepted: November 07, 2024

Published: November 15, 2024

**Cite as:** Onay MY. 2024. Resource allocation for a full-duplex symbiotic network with two devices based on the technique of harvesting energy from electromagnetic waves. BSJ Eng Sci, 7(6): 1361-1368.



## 1. Giriş

6G teknolojisi ile fiziksel ortamlardaki verilerin kablosuz cihazlar tarafından algılanması, izlenmesi, hızlı ve gecikmesiz olarak düşük enerjide alıcı terminale aktarılması işleminin, geliştirilecek yeni haberleşme protokolleri sayesinde mümkün olacağı öngörülmektedir (Wang ve ark., 2023). Örneğin uzak, erişilemez veya tehlikeli bölgelere konumlandırılmış kablosuz cihazlar mevcut sistem gereksinimlerine hizmet verebilir. Ancak bu tip kablosuz cihazlar için maliyet ve güvenlik endişeleri nedeniyle düzenli pil değişimi çok pratik değildir. Bu sebeple, hem gelecek nesil haberleşme sistemleri için sürdürülebilir ağ operasyonları elde etmek hem de enerji tüketimini azaltmak için yeşil iletişimi teşvik edecek yeni yöntemler geliştirildi (Guo ve ark., 2017; Pradhan ve Priyanka, 2020). Radyo dalgalarının elektromanyetik spektrumda en büyük dalga boyuna yani en küçük frekansa sahip elektromanyetik dalga olma özelliği, kablosuz güç transferi yöntemiyle elektromanyetik dalgalardan faydalanılarak enerji hasadı gerçekleştirilmenin önünü araştırmacılara açtı (Kang ve ark., 2015, Ullah ve ark., 2024). Bu bağlamda, elektromanyetik dalgalardan enerji hasat etme tekniği, özellikle IoT paradigmasında ve 6G iletişimde kendi kendini idame ettiren iletişim sistemleri oluşturma potansiyeli nedeniyle oldukça önem kazanmaktadır (Lu ve ark., 2014; Seid ve ark., 2022; Psomas ve ark., 2024). Bu sebeple, gelecekteki IoT ağlarında enerji hasat etme tekniğini etkin bir şekilde kullanmak için, enerji tabanlı verimli iletişim stratejileri dizayn etmek kaçınılmazdır.

Kablosuz ağların yalnızca standart veya programlı iletişim cihazlarına değil, aynı zamanda cihazların birbirleriyle işbirlikçi bir yaklaşımla hareket ettikleri simbiyotik ağlar da bu kapsamda düşünülerek, sistem performansının artırılması beklenmektedir (Mahmood ve ark., 2021; Al-Nahari ve ark., 2023; Janjua ve Arslan, 2023). Ağ kapasitesini en üst düzeye çıkarırken enerji tüketimini en aza indirmek için yeni spektrum yönetim tekniklerinin geliştirilmesine rehberlik edecek simbiyotik ağlar, aynı alıcıya bit iletimi gerçekleştiren ve frekans spektrumunu ortak kullanan cihazlardan oluşur (Long ve ark., 2019a, Yuan ve ark., 2023, Yang ve ark., 2023). Bu cihazlar, simbiyotik ağlarda ortak hareket ederek hem kendi haberleşme hedeflerine ulaşırlar hem de diğer cihazın bit iletimine yardımcı olarak sistem performansını üst seviyelere çıkarırlar (Giordani ve ark., 2020; Ghafoor ve Siddiqui, 2024). Simbiyotik ağda çalışan cihazlar, radyo frekans sinyalinin enerji hasadı yapmanın yanında geri saçılım haberleşme ile de bit aktarımı gerçekleştirebilirler. Yeni nesil iletişim sistemleri için enerji sorununun üstesinden gelme potansiyeline sahip olan geri saçılım haberleşmede, anten yük empedansının değiştirilip anten yansıma katsayısının ayarlanarak bit dizisini elektromanyetik dalga türü olan radyo frekans dalga formlarına eşleme yöntemi kullanılır (Long ve ark., 2019b; Liang ve ark., 2020; Ren ve Liu, 2023). Literatürde yürütülen çalışmalarda mevcut sistemlerde görev alan cihazların

geri saçılım haberleşme ve enerji hasadı yapabilmesi, özellikle IoT tabanlı sistem modellerinin performansı açısından ciddi katkı sağlamaktadır. (Onay, 2024a, b).

6G kapsamında yürütülen çalışmaların temelinde sistemin toplam bit hızını artırma hedefi vardır (Onay ve Ertuğ, 2023a). Bu konu kapsamında sunulan protokoller daha çok cihazların işbirliksiz olarak harici bir alıcıya bilgi iletiminde bulunduğu yapılarıdır. Ayrıca türetilen optimizasyon problemlerinde sadece zaman veya güç kaynak tahsis şemaları ele alınmış ve sistem performansı cihazların hasat ettikleri enerji seviyesi dikkate alınmadan tek kapasite formülü yazılarak bit hızı maksimize edilmiştir (Kang ve ark., 2015; Zhang ve ark., 2019).

Bu makalede, elektromanyetik dalgalardan enerji hasat etme tekniğine dayalı iki cihaza sahip çift yönlü simbiyotik radyo ağı için zaman ve güç açısından kaynak tahsisi birlikte düşünülmüş ve sistemin toplam bit hızı maksimize edilmiştir. Sunulan sistem, IoT tabanlı simbiyotik ağlarda güç istasyonunun çift yönlü düşünülerek hasat edilen enerji seviyesine göre bit hızının maksimize edildiği ilk yaklaşımdır. Önerilen sistem modeli gelecek nesil haberleşme sistemlerinde akıllı şehir uygulamaları kapsamında özellikle veri toplama-izleme-denetleme faaliyetleri açısından değerlendirilebilir. FDPS terminali, Onay ve Ertuğ (2023b) çalışmasından farklı olarak çift yönlü donatılmış alıcı-verici terminalidir. FDPS'den uzak-yakın olacak şekilde konumlandırılmış iki kablosuz cihaz, Yang ve ark. (2023), Ullah ve ark. (2024)'ten farklı olarak hem FDPS sinyalinden enerji hasadı yapabilmekte hem de geri saçılım yoluyla FDPS alıcı antenine bilgi iletebilmektedir. Guo ve ark. (2017) ve Liang ve ark. (2020) senaryolarının aksine, önerilen sistem modelinde işbirlikli ve işbirliksiz senaryolar dikkate alınmış ve simbiyotik ağın performansı değerlendirilmiştir. Bit hızının maksimize edildiği Kang ve ark. (2015) ve Onay (2024) benzer çalışmalarından farklı olarak bu yaklaşımda, enerji seviyesi değişimi ve kullanıcılara tahsis edilecek güç-zaman kaynakları açısından bir optimizasyon problemi türetilmiştir. Son olarak toplam bit hızı değişimi, sistem parametrelerine göre bulunmuş ve grafiksel olarak gösterilmiştir.

Bu makalenin temel katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

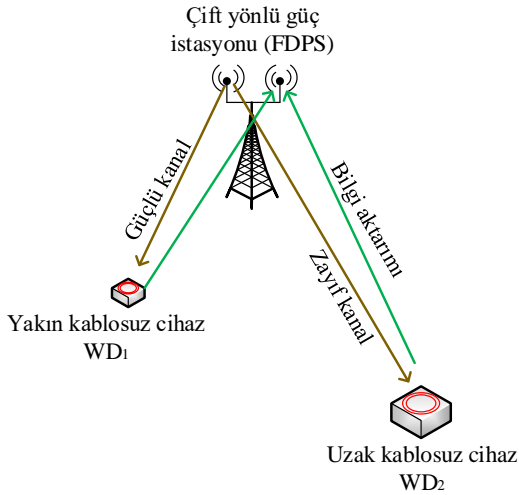
1. Çift yönlü iletişimin temel alındığı IoT tabanlı simbiyotik radyo ağları için önerilen bu sistem, güç tahsis katsayıları ve zaman değişkenlerinin birlikte optimize edilerek enerji hasat etme tekniğine dayalı sistemin toplam bit hızının maksimize edilmeye çalışıldığı ilk yaklaşımdır.
2. Sistem modelindeki cihazların hasat ettiği enerjinin miktarına göre olası tüm kanal kapasitesi ifadeleri yazılmış ve optimizasyon probleminin objektif fonksiyonu değerlendirilmiştir.
3. Önerilen sistemde çift yönlü güç istasyonu (FDPS), iki antene sahip olup hem verici hem alıcı görevi görmektedir.
4. Önerilen modelde iki farklı senaryo düşünülmüştür.

İşbirliksiz senaryoda kablosuz cihazlar kendi haberleşme hedefine ulaşmaya çalışırken, işbirlikli senaryoda ise cihazlar simbiyotik bir ilişki içinde bilgi aktarımını gerçekleştirmektedirler.

5. Simülasyon sonuçlarında, farklı parametreler üzerinden sistem performansı test edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, FDPS'nin sinyal gücünün düşük olması, uzak cihazın iletişimini ciddi manada etkilemektedir. Ayrıca sistemi çok yüksek frekanslarda kullanmak performansta bir miktar düşüşe sebep olmuştur. Son olarak, işbirlikli senaryonun işbirliksiz senaryoya göre sistem parametrelerinden daha az etkilendiği ve performans açısından daha üstün olduğu grafiksel sonuçlarda gösterilmiştir.
6. Önerilen sistem modeli gelecek nesil haberleşme sistemlerinde akıllı şehir uygulamaları kapsamında özellikle veri toplama-izleme-denetleme faaliyetleri açısından değerlendirilebilir.

## 2. IoT Tabanlı Sistem Modeli

Önerilen sistem modeli Şekil 1'de verilmiştir. İki farklı yere konumlandırılmış IoT cihazları, FDPS ile iletişim halindedir. FDPS, iki anten aracılığıyla tam çift yönlü çalışır: biri aşağı bağlantıdaki cihazlara kablosuz enerji yayımı için, diğeri ise yukarı bağlantıda kullanıcılardan eşzamanlı olarak bilgi almak için. Burada FDPS terminalinin sahip olduğu iki anten arasında sinyal girişimi olmadığı kabul edilmiştir. Önerilen haberleşme protokolünde  $\Phi_0$  süresince FDPS terminali, her iki cihaza kablosuz olarak enerji aktarımı yapar.



Şekil 1. Önerilen sistem modeli.

FDPS, cihazlar arasındaki kanal sönümleme kazancına göre ilettiği gücü uyarlayabilme yeteneğine sahiptir. Haberleşme kanalı, serbest uzay yol kaybı olarak modellenip terminaller arasında herhangi bir engelin bulunmadığı varsayılmıştır. Terminaller arasındaki kanal kazançları aşağıdaki denklemler ile verilebilir (eşitlik 1-3).

$$g_{P_s-f} = g_{f-P_s} = \frac{G_f G_f \lambda^2}{(4\pi d_{f-P_s})^2} \quad (1)$$

$$g_{P_s-n} = g_{n-P_s} = \frac{G_f G_n \lambda^2}{(4\pi d_{n-P_s})^2} \quad (2)$$

$$g_{f-n} = \frac{G_f G_n \lambda^2}{(4\pi d_{f-n})^2} \quad (3)$$

burada, FDPS-WD<sub>2</sub>, FDPS-WD<sub>1</sub> ve WD<sub>1</sub>-WD<sub>2</sub> arası kanal kazançları ve mesafeler sırasıyla  $g_{f-P_s}$  ( $d_{f-P_s}$ ),  $g_{n-P_s}$  ( $d_{n-P_s}$ ) ve  $g_{f-n}$  ( $d_{f-n}$ ) olarak verilmiştir. Ayrıca FDPS anten kazancı  $G_f$ , WD<sub>1</sub> anten kazancı  $G_n$ , WD<sub>2</sub> anten kazancı  $G_f$ , sinyal dalga boyu  $\lambda$  ile temsil edilir. Sistem modelinin bit hızı açısından performans analizinin değerlendirilmesi için iki farklı senaryo düşünülmüştür.

### 2.1. İşbirliksiz Senaryo

Bu senaryoda  $\Phi_1$  süresince sadece WD<sub>1</sub> aktiftir.  $\Phi_0$  süresince hasat edilen enerji seviyesine göre aktif ya da pasif haberleşme tekniğini uygulayan WD<sub>1</sub>, alıcı antene bit iletimini gerçekleştirmektedir. Aynı şekilde WD<sub>2</sub> de, kendisinde depolanan güç seviyesine göre  $\Phi_2$  süresince aktif ya da pasif haberleşme yöntemiyle bit iletimini yürütmektedir.

#### 2.1.1. İşbirliksiz senaryoda WD<sub>1</sub> için kanal kapasitesi ve enerji hasat etme protokolü

WD<sub>1</sub> için kanal kapasitesi formülü eşitlik 4'deki gibi yazılabilir.

$$R_n^1 = \begin{cases} \phi_1 \log_2 \left( 1 + \frac{P_n g_{n-P_s}}{N_0} \right), & E_h^n > E_c \text{ ise} \\ \phi_1 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \alpha_n \alpha_f g_{P_s-n} g_{n-P_s}}{N_0} \right), & E_h^n \leq E_c \text{ ise} \end{cases} \quad (4)$$

Eşitlik 4'te, anten yansımaya katsayısı  $\alpha$ , yakın kablosuz cihaz için güç tahsis katsayısı  $\alpha_n$  ( $0 < \alpha_n \leq 1$ ), uzak kablosuz cihaz için güç tahsis katsayısı  $\alpha_f$  ( $0 < \alpha_f \leq 1$ ), FDPS sinyal gücü  $P_s$  olarak ifade edilmiştir. Uzak kullanıcıya daha fazla güç tahsis edilmesi gerektiğinden burada  $0 < \alpha_n \leq \alpha_f \leq 1$  dir. Gürültü gücü  $N_0$  olup tüm terminallerde eşit olduğu varsayılmıştır. Enerji hasat etme protokolü için eşitlik 5 ve 6'da verilen denklemler yazılabilir.

$$P_n = \frac{E_n}{\phi_1} \quad (5)$$

$$E_n = E_h^n - E_c \quad (6)$$

$$E_h^n = P_s \alpha_n g_{P_s-n} \phi_0 + E_i$$

burada  $P_n$ , WD<sub>1</sub>'in aktif bit iletimi sırasında gönderdiği sinyalin gücü,  $E_h^n$ , WD<sub>1</sub> tarafından hasat edilen enerji,  $E_i$  başlangıç enerjisi,  $E_c$  bit iletim sırasında WD<sub>1</sub> tarafından harcanan enerjidir. Eşitlik 4'ten görüleceği üzere WD<sub>1</sub>'in aktif bit iletiminde çalışabilmesi için gerekli koşul eşitlik

7'deki gibidir.

$$E_h^n > E_c \quad (7)$$

Bu koşul sağlanmadığı takdirde WD<sub>1</sub>, FDPS'nin sinyalini geri saçarak pasif haberleşme yöntemi ile bilgi aktarımını gerçekleştirir. eşitlik 6, eşitlik 7'de yerine yazılırsa aşağıdaki verilen eşitsizlik (eşitlik 8) elde edilir.

$$P_s \alpha_n g_{P_s-n} \phi_0 + E_i > E_c$$

$$1 > \phi_0 > \frac{E_c - E_i}{P_s \alpha_n g_{P_s-n}} \quad (8)$$

İşbirliksiz senaryo için WD<sub>1</sub>'in çalışma durumu Eşitlik 9'daki gibi özetlenebilir.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Aktif haberleşme ile bit iletimi, } 1 > \phi_0 > \frac{E_c - E_i}{P_s \alpha_n g_{P_s-n}} \text{ ise} \\ \text{Pasif haberleşme ile bit iletimi, } 0 < \phi_0 < \frac{E_c - E_i}{P_s \alpha_n g_{P_s-n}} \text{ ise} \end{array} \right. \quad (9)$$

### 2.1.2. İşbirliksiz senaryoda WD<sub>2</sub> için kanal kapasitesi ve enerji hasat etme protokolü

WD<sub>1</sub>'e benzer şekilde, WD<sub>2</sub> için kanal kapasitesi formülü eşitlik 10'daki gibi yazılabilir.

$$R_f^1 = \left\{ \begin{array}{l} \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_f g_{f-P_s}}{N_0} \right), E_h^f > E_c \text{ ise} \\ \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \alpha_f \alpha g_{P_s-f} g_{f-P_s}}{N_0} \right), E_h^f \leq E_c \text{ ise} \end{array} \right. \quad (10)$$

WD<sub>2</sub> için enerji hasat etme protokolü Eşitlik 11 ve 12'deki gibi yazılabilir.

$$P_f = \frac{E_f}{\phi_2} \quad (11)$$

$$E_f = E_h^f - E_c$$

$$E_h^f = P_s \alpha_f g_{P_s-f} \phi_0 + E_i \quad (12)$$

Burada, P<sub>f</sub>, WD<sub>2</sub>'nin aktif bit iletimi sırasında gönderdiği sinyalin gücü, E<sub>f</sub><sup>f</sup>, WD<sub>2</sub> tarafından hasat edilen enerjidir. Eşitlik 10'dan görüleceği üzere WD<sub>2</sub>'nin aktif bit iletiminde çalışabilmesi için gerekli koşul aşağıda verilen eşitlik 13 ve 14'deki gibidir.

$$E_h^f > E_c \quad (13)$$

$$P_s \alpha_f g_{P_s-f} \phi_0 + E_i > E_c$$

$$1 > \phi_0 > \frac{E_c - E_i}{P_s \alpha_f g_{P_s-f}} \quad (14)$$

Sonuç olarak işbirliksiz senaryo için WD<sub>2</sub>'nin çalışma durumu eşitlik 15 ve 16'daki gibi özetlenebilir.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Aktif haberleşme ile bit iletimi, } 1 > \phi_0 > \frac{E_c - E_i}{P_s \alpha_f g_{P_s-f}} \text{ ise} \\ \text{Pasif haberleşme ile bit iletimi, } 0 < \phi_0 < \frac{E_c - E_i}{P_s \alpha_f g_{P_s-f}} \text{ ise} \end{array} \right. \quad (15)$$

$$(16)$$

İşbirliksiz senaryo için FDPS'nin alıcı antenine ulaşan toplam bit sayısı, olası tüm durumlar dikkate alınarak denklem 16'daki gibi ifade edilebilir. E<sub>h</sub><sup>n</sup> > E<sub>c</sub> durumları için φ<sub>2</sub> süresince, alıcı anten kısmında WD<sub>1</sub> kaynaklı gürültü mevcuttur. Bunun sebebi, WD<sub>1</sub>'in aktif bit iletimi yapmasıyla bir önceki periyottan (φ<sub>1</sub> süresi) artık sinyal kalmasıdır. Denklemdeki τ (0 < τ < 1), sabit bir katsayı olup FDPS'nin alıcı anten tarafındaki kusurlu ardışık girişim giderici katsayısıdır.

### 2.2. İşbirlikli Senaryo

İşbirliksiz senaryodan farklı olarak φ<sub>2</sub> süresince WD<sub>1</sub>, WD<sub>2</sub>'nin rölesi gibi davranarak simbiyotik bir ilişki içinde bit aktarımını gerçekleştirir.

#### 2.2.1. İşbirlikli senaryoda WD<sub>1</sub> için kanal kapasitesi ve enerji hasat etme protokolü

İşbirliksiz senaryo için yazılan denklem 4'teki R<sub>n</sub><sup>1</sup> ifadesi, işbirlikli senaryoda WD<sub>1</sub>'in alıcı antene gönderdiği bit sayısı R<sub>n</sub><sup>2</sup>'ye eşittir. Aralarındaki tek fark enerji hasat denklemindedir. İşbirlikli senaryoda WD<sub>1</sub>'in hasat ettiği enerji Eşitlik 17'deki denklem ile verilir.

$$E_h^n = (P_s \alpha_n g_{P_s-n} \phi_0) \gamma + E_i \quad (17)$$

burada γ, güç bölme faktörüdür.

#### 2.2.2. İşbirlikli senaryoda WD<sub>2</sub> için kanal kapasitesi ve enerji hasat etme protokolü

$$R_f^2 = \left\{ \begin{array}{l} \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_n^r g_{n-P_s}}{N_0} \right), E_n^r > E_c^r \text{ ise} \\ \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \alpha_f \alpha g_{P_s-f} g_{f-n} g_{n-P_s}}{N_0} \right), E_n^r \leq E_c^r \text{ ise} \end{array} \right. \quad (18)$$

burada E<sub>c</sub><sup>r</sup>, WD<sub>1</sub>'in φ<sub>2</sub> süresince röle olarak kullanımı sırasında harcanan enerjidir. WD<sub>1</sub>'in röle olarak kullanımı sırasında gönderdiği sinyalin gücü P<sub>n</sub><sup>r</sup>, aşağıda verilen Eşitlik 19-21'deki gibi yazılabilir.

$$P_n^r = P_f g_{f-n} + P_h^n \quad (19)$$

$$P_f = \frac{E_f}{\phi_2} = \frac{P_s \alpha_f g_{P_s-f} \phi_0 + E_i - E_c}{\phi_2} \quad (20)$$

$$P_h^n = \frac{(P_s \alpha_n g_{P_s-n} \phi_0)(1 - \gamma) + E_i - E_c}{\phi_2} \quad (21)$$

WD<sub>1</sub> tarafından hasat edilen net enerji (Eşitlik 22),

$$E_n^r = P_n^r \phi_2$$

$$= (P_s \alpha_f g_{P_s-f} \phi_0 + E_i - E_c) g_{f-n}$$

$$+ ((P_s \alpha_n g_{P_s-n} \phi_0)(1 - \gamma) + E_i - E_c) > E_c^r \quad (22)$$

ile temsil edilir. WD<sub>1</sub>'in WD<sub>2</sub>'nin rölesi olarak çalıştığı φ<sub>2</sub> süresince çalışma durumları şu şekilde özetlenebilir.

$E_n^r > E_c^r$  ise  $WD_1$ ,  $WD_2$ 'nin rölesi olarak çalışır ve bilgiyi aktif olarak FDPS'nin alıcı antenine iletir.  $E_n^r \leq E_c^r$  ise  $WD_1$ ,  $WD_2$ 'nin yine rölesi olarak çalışır ancak bu sefer bilgiyi pasif olarak FDPS'nin alıcı antenine iletir. Her iki senaryoda da  $WD_2$ 'nin bit iletiminin  $WD_1$ 'den sonra

olmasının nedeni, daha fazla enerji hasat etmesine imkân sağlamak içindir. İşbirlikli senaryo için FDPS'nin alıcı antenine ulaşan toplam bit sayısı, olası tüm durumlar dikkate alınarak denklem 23'deki gibi ifade edilebilir.

$$R_1 = \begin{cases} \phi_1 \log_2 \left( 1 + \frac{P_n g_{n-P_s}}{N_0} \right) + \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_f g_{f-P_s}}{N_0 + P_n g_{n-P_s} \tau} \right), & \text{durum 1: } E_h^n > E_c \text{ ve } E_h^f > E_c \\ \phi_1 \log_2 \left( 1 + \frac{P_n g_{n-P_s}}{N_0} \right) + \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \alpha_f \alpha g_{P_s-f} g_{f-P_s}}{N_0 + P_n g_{n-P_s} \tau} \right), & \text{durum 2: } E_h^n > E_c \text{ ve } E_h^f \leq E_c \\ \phi_1 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \alpha_n \alpha g_{P_s-n} g_{n-P_s}}{N_0} \right) + \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_f g_{f-P_s}}{N_0} \right), & \text{durum 3: } E_h^n \leq E_c \text{ ve } E_h^f > E_c \\ \phi_1 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \alpha_n \alpha g_{P_s-n} g_{n-P_s}}{N_0} \right) + \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \alpha_f \alpha g_{P_s-f} g_{f-P_s}}{N_0} \right), & \text{durum 4: } E_h^n \leq E_c \text{ ve } E_h^f \leq E_c \end{cases}$$

$$R_2 = \begin{cases} \phi_1 \log_2 \left( 1 + \frac{P_n g_{n-P_s}}{N_0} \right) + \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_n^r g_{n-P_s}}{N_0 + P_n g_{n-P_s} \tau} \right), & \text{durum 1: } E_h^n > E_c \text{ ve } E_n^r > E_c^r \\ \phi_1 \log_2 \left( 1 + \frac{P_n g_{n-P_s}}{N_0} \right) + \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \alpha_f \alpha g_{P_s-f} g_{f-n} g_{n-P_s}}{N_0 + P_n g_{n-P_s} \tau} \right), & \text{durum 2: } E_h^n > E_c \text{ ve } E_n^r \leq E_c^r \\ \phi_1 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \alpha_n \alpha g_{P_s-n} g_{n-P_s}}{N_0} \right) + \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_n^r g_{n-P_s}}{N_0} \right), & \text{durum 3: } E_h^n \leq E_c \text{ ve } E_n^r > E_c^r \\ \phi_1 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \alpha_n \alpha g_{P_s-n} g_{n-P_s}}{N_0} \right) + \phi_2 \log_2 \left( 1 + \frac{P_s \alpha_f \alpha g_{P_s-f} g_{f-n} g_{n-P_s}}{N_0} \right), & \text{durum 4: } E_h^n \leq E_c \text{ ve } E_n^r \leq E_c^r \end{cases} \quad (23)$$

Bu makalede amacımız, hem  $R_1$  hem de  $R_2$  'yi  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\alpha_n$  ve  $\alpha_f$  değişkenleri üzerinden maksimize etmektir. Bu noktada problem çözümünde aşağıda verilen eşitsizlikler, her iki senaryo için de kısıt olarak değerlendirilir (Eşitlik 24-30).

$$R_n^1 \geq R_n^+ \quad (24)$$

$$R_f^1, R_f^2 \geq R_f^+ \quad (25)$$

$$0 < \alpha_n \leq \alpha_f \leq 1 \quad (26)$$

$$0 \leq \phi_1, \phi_2 \leq 1 \quad (27)$$

$$0 < \gamma \leq 1 \quad (28)$$

$$0 \leq \tau \leq 1 \quad (29)$$

$$\sum_{i=0}^2 \phi_i \leq 1 \quad (30)$$

Denklem 24 ve 25,  $WD_1$  ve  $WD_2$ 'nin hizmet kalitesini (QoS) garanti altına almak için göndermeleri gereken minimum bit sayısını ifade eder. Denklem 26, 27, 28 ve 29, sistem parametrelerinin 1'den büyük ve negatif bir sayı olamayacağını belirtir. Denklem 30, sistem periyodunun 1 saniyeyi geçemeyeceğini ve normalize edildiğini gösterir.

### 3. Nümerik Analiz ve Tartışma

Bu bölümde nümerik analizler yapılmış ve sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen simülasyonlarda kullanılan parametre değerleri aşağıdaki gibidir:  $P_s = 30$  dBm,  $\alpha = 0.7$ ,  $E_c = 3$   $\mu$ J,  $E_c^r = 0,1$   $\mu$ J,  $N_0 = 10^{-12}$  W,  $E_i = 2$   $\mu$ J,  $\phi_0 = 0,2$  s,  $R_n^+ = 3$  bps/Hz,  $R_f^+ = 1$  bps/Hz,  $\tau = 0,01$ ,  $\gamma = 0,5$ ,  $d_{f-P_s} = 3$  m,  $d_{n-P_s} = 1$  m,  $d_{f-n} = 2,1$  m,  $G_t = G_f = G_n = 6$  dBi,  $f = 2,4$  GHz. Aksi belirtilmediği sürece yukarıda verilen değerler referans alınmıştır.

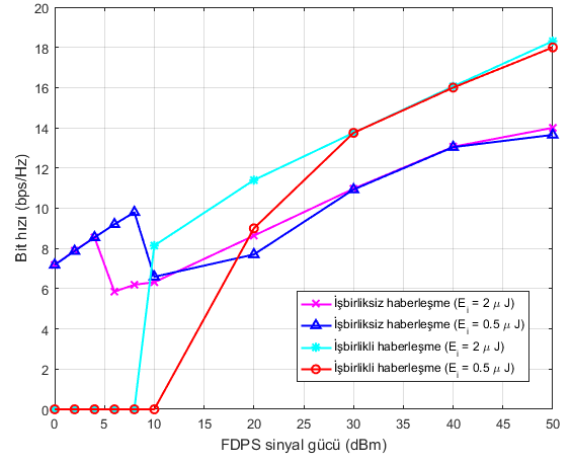
Şekil 2'de FDPS terminalinin verici anteninden yayılan sinyalin gücüne göre farklı başlangıç enerji seviyeleri altında sistemin ulaşabileceği toplam bit hızı değişimi gösterilmiştir. Grafiğe göre en yüksek bit iletim hızı işbirlikli haberleşme ( $E_i=2$   $\mu$ J) için elde edilirken, en düşük bit iletim hızı işbirliksiz haberleşme ( $E_i=0,5$   $\mu$ J)'da elde edilmiştir. Tüm senaryolarda kritik noktalarının elde edilmesinin sebebi, hasat edilen enerjiye bağlı olarak denklem 16 ve denklem 23 için verilen durum değişikliklerinin yaşanmasındandır. İşbirliksiz haberleşme ( $E_i=2$   $\mu$ J) senaryosunda,  $P_s = 4$  dBm değerinden sonra 6 dBm değerine kadar bit hızında azalış olmasının sebebi, optimizasyon probleminde enerji durum değişikliğidir.  $P_s=0, 2, 4$  dBm değerlerinde durum 4'te çalışan sistem,  $P_s=6$  dBm değerinden sonra durum 2'ye geçiş yapar.  $P_s=20$  dBm değerinden sonra durum 1'de çalışarak bit iletim hızı artırılır.  $E_i$ 'nin yüksek olması,

optimizasyon probleminde objektif fonksiyonunun durum 1'de kalmasını sağlayarak  $P_s$ 'nin yüksek değerleri için bit hızının artmasına sebep olur.  $P_s$ 'nin düşük değerleri için enerji durum değişikliklerinden dolayı sistem performansında artış ve azalışlar meydana gelmiştir. İşbirlikli haberleşme ( $E_i=2 \mu\text{J}$ ) için  $P_s=8 \text{ dBm}$ 'e kadar, işbirlikli haberleşme ( $E_i=0,5 \mu\text{J}$ ) için  $P_s=10 \text{ dBm}$ 'e kadar bit hızı 0 kabul edilir. Çünkü,  $R_f^2 \geq 1 \text{ bps/Hz}$  şartı sağlanamaz ve optimizasyon probleminin çözümü elde edilemez. Bu sonuç bize düşük  $P_s$  değerlerinin uzak kullanıcının iletişimini ciddi manada etkilediğini göstermektedir. Ayrıca durum 1'in aktif olduğu her iki senaryoda  $P_s$ 'nin artışı,  $WD_1$  kaynaklı girişim sinyalinden dolayı uzak kablosuz cihazın servis kalitesini sağlama koşulunu zorlaştırmaktadır. Bu yüzden  $\alpha_n$  güç tahsis katsayısı ile yakın kablosuz cihaza iletilen güç, mümkün olduğu kadar azaltılır.

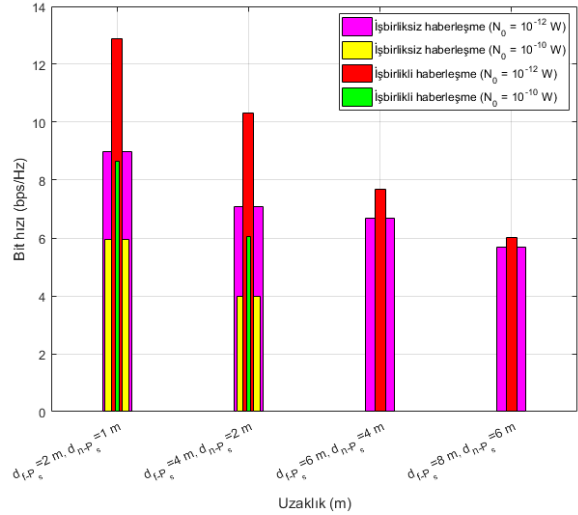
Şekil 3, terminaller arasındaki uzaklığa bağlı olarak farklı gürültü gücü seviyeleri altında bit hızı değişimini göstermektedir. Buradaki simülasyonda  $\tau=0,05$  olarak ayarlanmıştır. Terminaller arasındaki uzaklık arttıkça serbest uzay yol kaybı modeline göre kanal kazanç katsayıları düşer ve hasat edilen enerji azalır. Bu sonuç, sistemin bit hızının düşüşüne sebep olur. Grafik incelendiğinde aynı gürültü gücü seviyesinde işbirlikli haberleşme senaryosunun en iyi performans verdiği görülmüştür. Dolayısıyla  $WD_1$ 'in  $WD_2$  ile simbiyotik bir ilişki içinde olması, sistemin performansı açısından daha verimlidir. Simülasyon parametrelerinde kullanılan gürültü gücünün artışı, FDPS'deki alıcı antenin SNR değerini düşürdüğünden, sistemin toplam bit hızı ciddi manada etkilenmektedir. Şekil 3'ten görüleceği üzere  $d_{f-P_s} = 6 \text{ m}$ ,  $d_{n-P_s}=4 \text{ m}$  değerinden sonra  $N_0=10^{-10} \text{ W}$  için  $R_n^1 \geq 3 \text{ bps/Hz}$   $R_f^1, R_f^2 \geq 1 \text{ bps/Hz}$  servis kalitesi gereksinimleri sağlanamadığından optimizasyon probleminin çözümü elde edilemez ve bit hızı 0 kabul edilir.  $WD_1$ 'in FDPS'a olan uzaklığı arttıkça, bit hızı düşer. Ek olarak  $WD_2$  deki  $WD_1$  kaynaklı sinyal girişimi servis kalitesini sekteye uğratar. Bu yüzden yakın kullanıcıya tahsis edilen güç azaltılarak  $WD_2$ 'nin bit hızının artırılması sağlanır.

Farklı kusurlu ardışık girişim giderici katsayısı altında  $\alpha_n$  değişimine göre bit hızı değişimi Şekil 4'te gösterilmiştir.  $WD_1$  ve  $WD_2$ 'nin simbiyotik olarak işbirliği içerisinde hareket ettiği senaryoda  $WD_1$ 'e aktarılan güç arttıkça  $WD_2$ 'ye olan yardım artar ve bit hızında yükseliş görülür. Nitekim her iki  $\tau$  değeri için de işbirlikli senaryonun haberleşme performansı,  $\alpha_n=0,4$  değerinden sonra işbiriksiz senaryoya göre daha iyi performans göstermiştir. İşbiriksiz haberleşme ( $\tau=3 \times 10^{-3}$ ) senaryosunda,  $\alpha_n$ 'nin artışı ile denklem 16'da payda yer alan  $(P_n d_{n-P_s} \tau)$  ifadesinde artış meydana gelir. Zamansal dengeleme için her ne kadar optimal  $\phi_1$  değeri uygun olarak ayarlanırsa da  $R_f^1$  için servis kalitesini sağlamak, sistem performansında düşüşe sebep olur. Ek olarak işbiriksiz haberleşme ( $\tau=3 \times 10^{-3}$ ) senaryosunda  $\alpha_n=0,9$  ve 1 değerleri için uzak kablosuz cihazın servis kalitesi karşılanamadığından problemin çözümü

bulunamaz. Bu sonuç, sistem modelinde ele alınan işbirlikli senaryonun diğer senaryoya göre  $\tau$  parametresinden daha az etkilendiğini gösterir. İşbiriksiz haberleşmede  $\alpha_n$ 'nin belli bir değerinden sonra bit hızında azalmaların görülmesi, güç tahsis katsayısının uygun bir şekilde ayarlanmasının önemini göstermekte ve önerilen sistem modelinin üstünlüğünü açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 2. FDPS sinyal gücüne göre bit hızı değişimi.

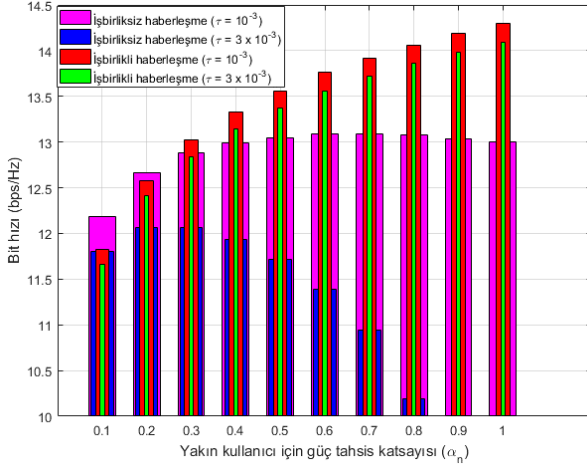


Şekil 3. Terminaller arasındaki uzaklığa göre bit hızı.

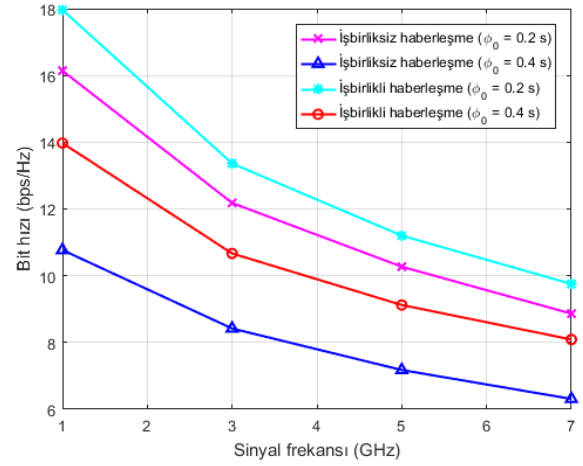
Şekil 5, sinyal frekansının sistemin performansına etkisini farklı  $\phi_0$  değerleri altında göstermektedir. Elde edilen simülasyon sonucunda,  $\tau=10^{-3}$  olarak ayarlanmıştır. Sinyal frekansının azalması tüm senaryolar için bit hızının azalmasına sebep olur. Bu sonuç beklenen bir durumdur. Çünkü kanal kazanç katsayıları sinyal frekansıyla ters orantılıdır. Kanal kazanç katsayısı azaldığı takdirde cihazlara aktarılan enerji azalır. Ek olarak cihazlardan FDPS'ye iletilen sinyal gücünde de zayıflama görülür. Sonuç olarak, sistemi çok yüksek frekanslarda kullanmak performansta düşüşe sebep olur. Ayrıca  $\phi_0$  enerji hasat etme süresini uzun tutmak, cihazların bit iletimi yapma sürelerini kısalttığından aynı senaryo içinde  $\phi_0 = 0,2$  durumu,  $\phi_0 = 0,4$  durumuna göre daha avantajlıdır.

#### 4. Sonuç

Bu makalede, elektromanyetik dalgalardan enerji hasat etme tekniğine dayalı iki cihaza sahip çift yönlü simbiyotik radyo ağı için kaynak tahsisi yapılmış ve sistemin toplam bit hızı maksimize edilmiştir. Sunulan sistem, IoT tabanlı simbiyotik ağlarda güç istasyonu çift yönlü düşünülerek hasat edilen enerji seviyesine göre bit hızının maksimize edildiği ilk yaklaşımdır. FDPS terminali, kendisinden yakın ve uzak olarak konumlandırılmış iki farklı cihaza kablosuz olarak enerji aktarımı yaptıktan sonra, bu cihazlar işbirlikli ve işbiriksiz senaryolarda FDPS alıcı antenine bilgi aktarımı gerçekleştirmektedir. Her iki senaryo için enerji hasat etme protokolü ve kanal kapasitesi yazılarak cihazlardaki enerji seviyesine göre toplam bit hızı ifadeleri çıkarılmıştır. Son olarak, nümerik analizle bit hızı maksimize edilip sistem performansı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda düşük  $P_s$  değerinin uzak kullanıcının iletişimini ciddi manada etkilediği görülmektedir. Ayrıca sistemi çok yüksek frekanslarda kullanmanın performansta düşüşe sebep olduğu test edilmiştir. Karşılaştırmalı olarak verilen grafiksel sonuçlarda işbirlikli senaryonun işbiriksiz senaryoya göre sistem parametrelerinden daha az etkilendiği ve performans açısından daha üstün olduğu gösterilmiştir. Gelecek çalışmada, sistem modeline ikiden fazla cihaz yerleştirilerek daha karmaşık ağ yapılarında kaynak tahsis şemaları tasarlanacak ve analizler yapılacaktır.



Şekil 4. Güç tahsis katsayısına göre bit hızı.



Şekil 5. Sinyal frekansına göre bit hızı.

#### Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar, makalenin son halini incelemiş ve onaylamıştır.

	M.Y.O.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
SY	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, SY= sistem yönetimi.

#### Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedir.

#### Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

#### Kaynaklar

- Al-Nahari A, Jäntti R, Zheng G, Mishra D, Nie M. 2023. Ergodic secrecy rate analysis and optimal power allocation for symbiotic radio networks. *IEEE Access*, 11: 82327-82337.
- Ghafoor U, Siddiqui AM. 2024. 6G cognitive radio: Optimizing resources with cluster-assisted downlink hybrid multiple access. *Phys Commun*, 66: 102435.
- Giordani M, Polese M, Mezzavilla M, Rangan S, Zorzi M. 2020. Toward 6G networks: Use cases and technologies. *IEEE Commun Mag*, 58(3): 55-61.
- Guo S, Shi Y, Yang Y, Xiao B. 2017. Energy efficiency

- maximization in mobile wireless energy harvesting sensor networks. *IEEE Trans Mob Comput*, 17(7): 1524-1537.
- Janjua MB, Arslan H. 2023. A survey of symbiotic radio: methodologies, applications, and future directions. *Sensors*, 23(5): 2511.
- Kang X, Ho CK, Sun S. 2015. Full-duplex wireless-powered communication network with energy causality. *IEEE Wirel Commun*, 14(10): 5539-5551.
- Liang YC, Zhang Q, Larsson EG, Li GY. 2020. Symbiotic radio: Cognitive backscattering communications for future wireless networks. *IEEE Trans Cogn Commun Netw*, 6(4): 1242-1255.
- Long R, Guo H, Liang YC. 2019a. Symbiotic radio with full-duplex backscatter devices. *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 20-24, Shanghai, China, pp: 1-6.
- Long R, Guo H, Zhang L, Liang YC. 2019b. Full-duplex backscatter communications in symbiotic radio systems. *IEEE Access*, 7: 21597-21608.
- Lu X, Wang P, Niyato D, Kim DI, Han Z. 2014. Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey. *IEEE Commun Surv Tutor*, 17(2): 757-789.
- Mahmood A, Beltramelli L, Abedin SF, Zeb S, Mowla NI, Hassan SA, Gidlund M. 2021. Industrial IoT in 5G-and-beyond networks: Vision, architecture, and design trends. *IEEE Trans Ind Info*, 18(6): 4122-4137.
- Onay MY, Ertuğ O. 2023a. Ambient backscatter communication based cooperative relaying for heterogeneous cognitive radio networks. *Radioengineering*, 32(2): 236-247.
- Onay MY, Ertuğ O. 2023b. Performance analysis under signal jammer in relay aided ambient backscatter cognitive radio networks. *31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, July 05-08, İstanbul, Türkiye, pp: 1-4.
- Onay MY. 2024a. Dynamic time allocation based physical layer security for jammer-aided symbiotic radio networks. *Radioengineering*, 33(3): 442-451.
- Onay MY. 2024b. Secrecy rate maximization for symbiotic radio network with relay-obstacle. *IJCSEEN*, 10(3): 381-387.
- Pradhan D, Priyanka KC. 2020. RF-Energy harvesting (RF-EH) for sustainable ultra dense green network (SUDGN) in 5G green communication. *SJEAT*, 5(6): 258-264.
- Psomas C, Ntougias K, Shanin N, Xu D, Mayer K, Tran NM, Krikidis I. 2024. Wireless Information and Energy Transfer in the Era of 6G Communications. *Proc IEEE*, 112(7): 764-804.
- Ren C, Liu L. 2023. Toward full passive internet of things: Symbiotic localization and ambient backscatter communication. *IEEE Internet Things J*, 10(22): 19495-19506.
- Seid AM, Lu J, Abishu HN, Ayall TA. 2022. Blockchain-enabled task offloading with energy harvesting in multi-UAV-assisted IoT networks: A multi-agent DRL approach. *IEEE J Sel Areas Commun*, 40(12): 3517-3532.
- Ullah SA, Mahmood A, Nasir AA, Gidlund M, Hassan SA. 2024. DRL-driven optimization of a wireless powered symbiotic radio with nonlinear EH model. *OJ-COMS*, 5: 5232-5247.
- Wang CX, You X, Gao X, Zhu X, Li Z, Zhang C, Hanzo L. 2023. On the road to 6G: Visions, requirements, key technologies, and testbeds. *IEEE Commun Surv Tutor*, 25(2): 905-974.
- Yang H, Ding H, Elkashlan M, Li H, Xin K. 2023. A novel symbiotic backscatter-NOMA system. *IEEE Trans Veh Technol*, 72(8): 11006-11011.
- Yuan Y, Xu X, Han S, Sun M, Zhang P, Yue, C. 2023. Energy-aware multiuser symbiotic communications enhanced by RIS for passive IoT. *IEEE Internet Things J*, 11(1): 1398-1412.
- Zhang L, Liang YC, Niyato D. 2019. 6G Visions: Mobile ultra-broadband, super internet-of-things, and artificial intelligence. *China Commun*, 16(8): 1-14.