



# Theoretical Analysis of Wireless Communication Systems Assisted by RIS with Power Line Communication

Beren TİDİN<sup>1</sup> , Mehmet BİLİM<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Nuh Naci Yazgan University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronics ENgineering, Kayseri, Turkey

## Article Info

Research article  
Received: 21/02/2024  
Revision: 01/04/2024  
Accepted: 01/04/2024

## Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, a detailed analysis of a wireless communication system model assisted by reconfigurable intelligent surface (RIS) which includes power line communication (PLC) systems is presented. / Bu çalışmada uyarlanabilir akıllı yüzey destekli enerji hattı iletimini içeren bir kablosuz haberleşme sistemini detaylı analizleri sunulmuştur.

## Keywords

Power line communication,  
Reconfigurable intelligent surfaces,  
Error analysis,  
Outage analysis

## Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 21/02/2024  
Düzeltilme: 01/04/2024  
Kabul: 01/04/2024

## Anahtar Kelimeler

Enerji hattı iletişimi,  
Uyarlanabilir akıllı yüzeyler,  
Hata analizi,  
Servis-dışı kalma analizi

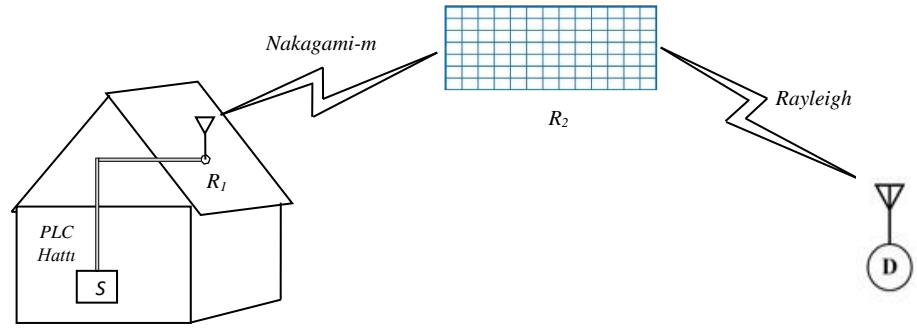


Figure 1: The schematic representation of the system model under consideration / Şekil 1: Ele alınan sistem modelinin şematik gösterimi

## Highlights (Önemli noktalar)

- The inter-node transmission links in the system have been considered as Power Line Communications (PLC), Nakagami-m, and Rayleigh. / Sistemdeki düğümler arası iletim hatları PLC, Nakagami-m ve Rayleigh olarak ele alınmıştır.
- A cumulative distribution function (CDF) for the end-to-end instantaneous signal-to-noise ratio (SNR) of the system has been derived. / Sistemin uçtan uca anlık işaret gürlüğü oranına ait birikimli (kümülatif) dağılım fonksiyonu türetilmiştir.
- Furthermore, utilizing the derived CDF, the error probability and outage probability expressions for the investigated system has been derived and theoretically analyzed. / Türetilen CDF'ten faydalanılarak incelenen sistemin hata olasılığı ve servis-dışı kalma olasılığı ifadesi türetilmiş ve kuramsal olarak analizi gerçekleştirilmiştir.

**Aim (Amaç):** The main objective of this study is to conduct outage probability and error probability analyses of the considered RIS-assisted system containing PLC using a CDF-based approach. / Bu çalışmanın temel amacı, ele alınan PLC içeren RIS destekli sistemin kesinti olasılığı ve hata olasılığı analizlerini bir CDF tabanlı yaklaşım kullanarak yapmaktır.

**Originality (Özgünlük):** The originality of this study can be emphasized by considering a system with a relay node containing PLC for the first time in the literature, along with an RIS-supported relay node. / Bu çalışmanın özgünlüğü, literatürde ilk kez bir PLC içeren bir röle düğümü ve bir RIS destekli röle düğümünü içeren bir sistem göz önüne alınarak vurgulanabilir.

**Results (Bulgular):** The results of various scenarios (such as different modulation types, varying numbers of reflective elements, different fading conditions, etc.) were presented using numerical calculations based on the derived outage probability and error probability expressions for the system. / Sistem için elde edilen kesinti olasılığı ve hata olasılığı ifadelerine dayalı olarak, çeşitli senaryoların sonuçları (farklı modülasyon tipleri, değişen yansıtıcı eleman sayıları, farklı zayıflama koşulları vb.) sayısal hesaplamalar kullanılarak sunulmuştur.

**Conclusion (Sonuç):** The results presented for the considered system model clearly demonstrate that the proposed expressions in this study are consistent with the results of exact simulations and exhibit the expected behaviors. / İncelenen sistem modeli için sunulan sonuçlar, bu çalışmada önerilen ifadelerin tam simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğunu ve beklenen davranışları sergilediğini açıkça göstermektedir.



## Theoretical Analysis of Wireless Communication Systems Assisted by RIS with Power Line Communication

Beren TİDİN<sup>1</sup> , Mehmet BİLİM<sup>1\*</sup> <sup>1</sup>Nuh Naci Yazgan University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri, Turkey

### Article Info

Research article  
Received: 21/02/2024  
Revision: 01/04/2024  
Accepted: 01/04/2024

### Keywords

Power line  
communication,  
Reconfigurable intelligent  
surfaces, Error analysis,  
Outage analysis

### Abstract

This research study presents a detailed analysis of a wireless communication system model assisted by reconfigurable intelligent surface (RIS) which includes power line communication (PLC) systems. The transmission lines between nodes in the system are evaluated as PLC, considering Nakagami-m and Rayleigh channels. The cumulative distribution function (CDF) of the considered system is derived, and outage probability and error probability analyses are presented based on this derived CDF expression. The accuracy of the obtained expressions is demonstrated through comparative exact simulations with various scenarios.

## PLC İçeren RIS Destekli Kablosuz İletişim Sistemlerinin Kuramsal Analizi

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 21/02/2024  
Düzeltilme: 01/04/2024  
Kabul: 01/04/2024

### Anahtar Kelimeler

Enerji hattı iletişimi,  
Uyarlanabilir akıllı  
yüzeyler,  
Hata analizi,  
Servis-dışı kalma analizi

### Öz

Bu araştırma çalışması, enerji hattı iletişim (power line communications, PLC) sistemini içeren uyarlanabilir akıllı yüzey (reconfigurable intelligent surface, RIS) destekli bir kablosuz haberleşme sistem modelinin detaylı analizini sunmaktadır. Çalışmada ele alınan sistemde düğümler arası iletim hatları PLC, Nakagami-m ve Rayleigh olarak değerlendirilmektedir. Sisteme ait kümülatif dağılım fonksiyonun (cumulative distribution function, CDF) türetilmektedir. Türetilen bu CDF ifadesinden yararlanılarak servis-dışı kalma olasılığı ve hata olasılığı analizleri sunulmaktadır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen ifadelerin doğruluğu farklı senaryolarla birlikte tam simülasyonlarla kıyaslamalı olarak gösterilmektedir.

### 1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Günümüzdeki teknolojik gelişmeler gözönüne alındığında kablosuz haberleşme sistemlerinden beklenen gereklilikler artış göstermektedir. Bu gereklilikler için daima kablosuz iletişim sistemlerinde yenilikçi sistem modelleri, araştırmacılar tarafından ortaya atılmaktadır. Son yıllarda bu modellerden bir tanesi oldukça dikkat çekmektedir. Bu sistem modeli, uyarlanabilir akıllı yüzeyler (reconfigurable intelligence surfaces, RIS) olarak adlandırılmaktadır [1]-[5]. RIS sistemlerinde boyut sınırlaması avantajı olup, elektromanyetik bir yapıya sahip düzeni sayesinde birden fazla pasif röle görevi yapan üstünlükler söz konusudur. Bu sebeplerden dolayı son zamanlarda literatür incelemesi yapıldığında oldukça sık çalışıldığı

görülmektedir [6]-[10]. Bu çalışmalar incelendiğinde, RIS ile ilgili farklı bir sistem yapısının ele alındığı ve buna göre bir araştırma faaliyetinin gerçekleştirildiği görülmektedir. RIS'ın sağlamış olduğu avantajların bu çalışmalarda da vurgulandığı görülmektedir.

Öte yandan enerji hattı iletişim (power line communication, PLC) sistem modeli de var olan bina-içi hatların kullanılmasını öneren ve ilave bir maliyet gerektirmeden iletişim sağlayan bir model olarak ortaya çıkmış ve son yirmi yılda üzerine yoğun bir şekilde çalışılmıştır. PLC tekniğinin diğer sistemleri içeren farklı araştırmaları literatürde mevcuttur [11]-[16]. Bina-içi PLC sistemleri, hazırda bulunan hatlardan faydalandığı için akıllı iletişim araştırmalarında kayda değer bir konu

olarak dikkat çekmektedir. Bina-içinde hali hazırda var olan şebeke hatlarını kullanması bu tekniğin en önemli avantajı olarak değerlendirilmektedir. Ek maliyet olmadan iletim hatlarının olması, diğer kablolu sistemlere göre PLC teknolojisini ön plana çıkarmaktadır.

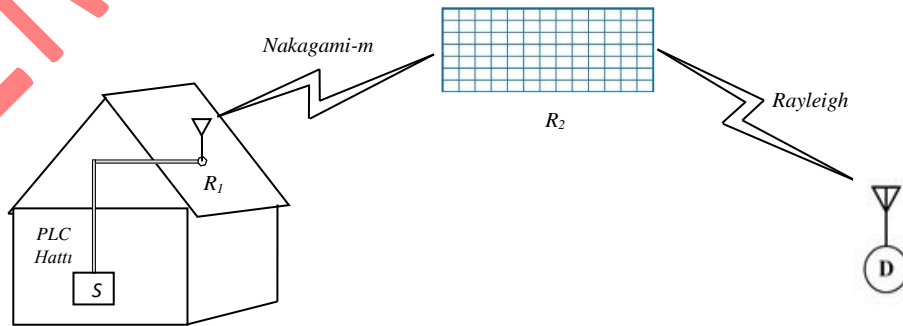
Bütün bu sebeplerden dolayı bu çalışma kapsamında, PLC sistemini içeren RIS destekli bir kablosuz haberleşme sistem modeli ele alınmaktadır. PLC içeren RIS destekli bu özgün kablosuz haberleşme sisteminin hata analizleri detaylıca ele alınmıştır. Çalışmanın ana katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Sistemdeki düğümler arası iletim hatları PLC, Nakagami- $m$  ve Rayleigh olarak ele alınmıştır.
- Röle düğümlerinde çöz-ve-aktar (decode-and-forward) iletim protokolü kullanılmış ve buna uygun analiz metodları uygulanmıştır.
- İlk iki maddedeki özellikleri taşıyan ve çalışmada incelenen sistemin uçtan uca anlık işaret gürültü oranına (instantaneous signal to noise ratio, SNR) ait birikimli (kümülatif) dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF) türetilmiştir.
- Türetilen CDF kullanılarak ele alınan sistemin servis-dışı kalma olasılığının (outage probability, OP) analizi yapılmıştır.
- Yine türetilen CDF'ten faydalanılarak incelenen sistemin hata olasılığı (error probability,  $P_e$ ) ifadesi türetilmiş ve kuramsal olarak analizi gerçekleştirilmiştir.
- Sistem için türetilen OP ve  $P_e$  ifadelerini kullanarak nümerik hesaplamalarla farklı senaryolara (modülasyon çeşitleri, farklı yansıtıcı eleman sayısı, farklı sönümlenme koşulları vb. gibi) ait sonuçlar sunulmuştur.

Sunulan bu ana katkılar gözününe alındığında çalışmanın motivasyonu şu şekilde belirtilebilir; yazarların bildiği kadarıyla, literatürde ilk kez PLC içeren ve Nakagami- $m$  sönümlü bir atlamaya sahip RIS destekli sistem modeli bu çalışmada ele alınmıştır. Buna göre yapılan analizler ve sonuçlar da özgün ve önemli katkıları içermektedir.

## 2. SİSTEM MODELİ (SYSTEM MODEL)

The Bu çalışmada, daha öncede bahsedildiği gibi, PLC sistemini içeren RIS destekli bir kablosuz haberleşme sistem modeli ele alınmaktadır. İncelenen sistemin şematik gösterimi Şekil 1'de sunulmaktadır. Bu çalışma kapsamında ele alınacak olan sistem modelinde iki adet röle (relay,  $R_1$  ve  $R_2$ ) bir adet kaynak (source,  $S$ ) ve bir adet hedef (destination,  $D$ ) noktası bulunmaktadır.  $S$ - $R_1$  arası PLC bağlantılı,  $R_1$ - $R_2$  arası Nakagami- $m$  sönümlü iken,  $R_2$  ile  $D$  arasının Rayleigh sönümlü olduğu kabul edilmektedir. PLC hattı kablolu bağlantı olduğundan  $R_1$  düğümü bu hattan gelen bilgiyi elektromanyetik dalga (RF) dönüşümünü yaparak  $R_2$  düğümüne iletim gerçekleştirebilmektedir.  $R_1$ - $R_2$  arasının Nakagami- $m$  sönümlü olmasının nedeni ise bu sönümlü kanal modelinin bina-dışı ortamlardaki kanalların temsil kabiliyetinin iyi olması ve  $m$  sönümlenme parametresi sayesinde Rayleigh sönümlü kanala dönüşme esnekliğine sahip olması olarak belirtilmektedir.  $R_2$  düğümünde RIS desteği bulunmakta,  $R_1$ 'den gelen sinyal  $D$ 'ye iletmek üzere, üzerinde bulunan yansıtıcı elemanlar sayesinde transfer edilmektedir. RIS destekli  $R_2$  ile  $D$  arasının Rayleigh sönümlü olmasının nedeni ise, direk olmayan görüş hattını (non line of sight, NLoS) iyi bir şekilde temsil etmesidir. Buna göre, bu kanala ait sönümlenme katsayıları Rayleigh dağılımlı olarak ele alınmaktadır. Böylelikle, bu kanal için  $D$ 'deki anlık SNR'ye ait PDF ise [17].



Şekil 1. Ele alınan sistem modelinin şematik gösterimi. (The schematic representation of the system model under consideration)

$$f_{\gamma_3}(\gamma) = \frac{\gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_3}}}{(B\bar{\gamma}_3)^N (N-1)!} \quad (2.1)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada  $N$ , RIS yapısındaki yansıtıcı eleman sayısı,  $B=1+(N-1)(\Gamma(3/2))^2$ ,  $\bar{\gamma}_3$  ise bu hatta ait ortalama SNR ifadesini belirtmektedir. Öte yandan PLC iletişim hattı kullanıldığından PLC iletim hattını modellemede kullanılan PDF ifadesinden faydalanılmaktadır. PLC teknolojisine ait farklı kanal modelleri literatüre bakıldığında görülmektedir [11], [13]-[15]. Bu çalışmada, yeni olan [13]'teki kanal yapısından faydalanılmıştır. [13]'te sunulan PLC kanal yapısı, bina-içinde iletim için uygun bir matematiksel ifade olup, başarılı sonuçlar vermektedir. O zaman, PLC iletimi için alıcısındaki SNR'nin PDF ifadesi şu şekildedir:

$$f_{\gamma_1}(\gamma) = Q_1 \gamma^{m_1-1} e^{-\zeta_1 \gamma} + Q_2 \gamma^{m_2-1} e^{-\zeta_2 \gamma} \quad (2.2)$$

burada

$$Q_1 = (1-PI)U_1 \quad (2.3)$$

$$Q_2 = PIU_2 \quad (2.4)$$

$$U_1 = \frac{(\zeta_1)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \quad (2.5)$$

$$U_2 = \frac{(\zeta_2)^{m_2}}{\Gamma(m_2)} \quad (2.6)$$

$$\zeta_1 = m_1 / \Omega_1 \quad (2.7)$$

$$\zeta_2 = m_2 / \Omega_2 \quad (2.8)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.  $PI$  dürtüye esas gürültüye (impulsive noise,  $IN$ ) ait oluşma olasılığı olup  $PI = \lambda T$  şeklindedir.  $\lambda$  her saniye için birim oranı,  $T$  ise  $IN$ 'ye ait zamandır.  $\Gamma(\cdot)$  Gamma işlevi,  $m_1$  ile  $m_2$  PLC kanalındaki gölgeleme parametreleri olarak  $m_1 = (e^{(\sigma_1)^2} - 1)^{-1}$  ve  $m_2 = (e^{(\sigma_2)^2} - 1)^{-1}$  şeklindedir. Ayrıca  $\sigma_1 = \sigma_2 = 2\tau$  biçiminde tanımlanırken  $\tau$  kanala ait katsayı,  $h$ , ise ortalama ifadesidir.  $\Omega_1$  ve  $\Omega_2$  ortalama güce ait terimlerdir ve  $\Omega_1 = e^{\tau_1} \sqrt{((1+m_1)/m_1)}$ ,

$\Omega_2 = e^{\tau_2} \sqrt{((1+m_2)/m_2)}$  şeklindedir.

$\tau_1 = 2\tau + \ln \bar{\gamma}_{1,1}$ ,  $\tau_2 = 2\tau + \ln \bar{\gamma}_{1,2}$  olarak tanımlanıp  $\bar{\gamma}_{1,1}$  arka-plan gürültüsünde (background noise,  $BN$ )

ortalama SNR'dir.  $\bar{\gamma}_{1,1} = \frac{E_b}{\sigma_G^2}$  olarak ifade edilir.

Burada  $E_b$  işaretin enerjisi ve  $\sigma_G^2$  ise bütün gürültüye ait varyansı belirtmektedir.  $\bar{\gamma}_{1,2}$  ise  $IN$  ve  $BN$  varken ortalama SNR ifadesi olarak değerlendirilmekte ve  $\bar{\gamma}_{1,2} = \frac{E_b}{(o+1)\sigma_G^2}$  olarak

tanımlanır. Burada  $o = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_G^2}$  olup,  $\sigma_1^2$  ise  $IN$ 'nin

varyansıdır [13]. Bu çalışmada  $R_1$  ve  $R_2$  arasındaki kanalın Nakagami- $m$  olmasından dolayı  $R_2$ 'deki anlık SNR'nin PDF ifadesi şu şekildedir:

$$f_{\gamma_2}(\gamma) = \left(\frac{m}{\bar{\gamma}_2}\right)^m \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-m \frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}\right) \quad (2.9)$$

Burada  $m$  sönümlenme parametresi,  $\bar{\gamma}_2$  ise bu hatta ait ortalama SNR ifadesidir.

### 3. KURAMSAL ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Burada ele alınan sistem için, CDF tabanlı analiz kullanılmaktadır. Bu sebeple, iki atlamalı DF tekniği için bütün sisteme ait CDF ifadesi [18]

$$F_{\gamma_{toplam}}(\gamma) = F_{\gamma_1}(\gamma) + F_{\gamma_2}(\gamma) - F_{\gamma_1}(\gamma)F_{\gamma_2}(\gamma) \quad (3.1)$$

şeklinde bulunmaktadır. Buradaki  $F_{\gamma_1}(\gamma)$  ve

$F_{\gamma_2}(\gamma)$  ifadeleri sırasıyla farklı sönümlü kanallara ait CDF'lerdir. Burada şu husus açıklanmalıdır ki; (3.1)'deki CDF ifadesi iki kez kullanılarak, sisteme ait toplam CDF ifadesi elde edilir. Bu sebeple, Şekil 1'de verilen sistem modeline göre  $S-R_1$  arasındaki iletişim hattı PLC olduğuna göre eşitlik (2.2)'de verilen PDF ifadesi,  $F_{\gamma}(\gamma) = \int_{-\infty}^{\gamma} F_{\gamma}(\gamma) d\gamma$  ifadesinde yerine konularak, [19, eşitlik (3.381.1)] yardımıyla

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = Q_1 (\zeta_1)^{-m_1} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) + Q_2 (\zeta_2)^{-m_2} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \quad (3.2)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $\gamma(\cdot, \cdot)$  tamamlanmamış Gama fonksiyonudur. Benzer şekilde Nakagami- $m$

ve Rayleigh sönümlü hatlar için verilen (2.9) ve (2.1)'deki PDF'ler kullanılarak,

$$F_{\gamma_2}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m)} \gamma \left( m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) \quad (3.3)$$

$$F_{\gamma_3}(\gamma) = \frac{\gamma \left( N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right)}{(N-1)!} \quad (3.4)$$

elde edilmektedir. (3.2)-(3.4) arasında verilen CDF ifadeleri (3.1)'de kullanılırsa

$$F_{\gamma_{toplum}}(\gamma) = \left[ Q_1(\zeta_1)^{-m_1} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) + Q_2(\zeta_2)^{-m_2} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \right] + \left[ \frac{\gamma \left( m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right)}{\Gamma(m)} - \left[ \frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{\Gamma(m)} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \gamma \left( m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) + \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{\Gamma(m)} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \gamma \left( m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) \right] + \left[ \frac{\gamma \left( N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right)}{(N-1)!} - \left[ \frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{(N-1)!} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \gamma \left( N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) + \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{(N-1)!} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \gamma \left( N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) + \frac{\gamma \left( m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) \gamma \left( N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right)}{\Gamma(m)(N-1)!} - \frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{\Gamma(m)(N-1)!} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \times \gamma \left( m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) \gamma \left( N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) - \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{\Gamma(m)(N-1)!} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \times \gamma \left( m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) \gamma \left( N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) \right] \right] \quad (3.5)$$

olarak türetilir. Eşitlik (3.5)'te  $\gamma$  yerine  $\gamma_{th}$  eşik değeri ifadesi yazıldığında sisteme ait OP ifadesi bulunmaktadır. Bilindiği kadarıyla (3.5)'te verilen CDF ifadesi literatürde ilk kez bu çalışma ile sunulmaktadır.

Ayrıca bu çalışmada  $P_e$  ifadesi de elde edilmiştir. Bu sebeple, CDF tabanlı hata ifadesi ise [20]

$$P_e = \frac{r^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} F_{\gamma_{toplum}}(\gamma) d\gamma \quad (3.6)$$

olarak tanımlanmaktadır. Buradaki ifadede  $r$  ve  $p$  modülasyon parametreleridir. Eşitlik (3.5)'te verilen sisteme ait toplam CDF ifadesini (3.6)'da yerine koyduğumuzda

$$P_e = \frac{r^p}{2\Gamma(p)} \left[ I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 + I_6 - I_7 - I_8 - I_9 + I_{10} + I_{11} \right] \quad (3.7)$$

ifadesi elde edilir. Burada

$$I_1 = Q_1(\zeta_1)^{-m_1} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) d\gamma \quad (3.8)$$

$$I_2 = Q_2(\zeta_2)^{-m_2} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) d\gamma \quad (3.9)$$

$$I_3 = \frac{1}{\Gamma(m)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma \left( m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) d\gamma \quad (3.10)$$

$$I_4 = \frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{\Gamma(m)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \gamma \left( m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) d\gamma \quad (3.11)$$

$$I_5 = \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{\Gamma(m)} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \gamma \left( m, \frac{m}{\gamma_2} \gamma \right) d\gamma \quad (3.12)$$

$$I_6 = \frac{1}{(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma \left( N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) d\gamma \quad (3.13)$$

$$I_7 = \frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \gamma \left( N, \frac{1}{B\gamma_3} \gamma \right) d\gamma \quad (3.14)$$



$$I_8 = \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \gamma\left(N, \frac{1}{B\bar{\gamma}_3} \gamma\right) d\gamma \quad (3.15)$$

$$I_8 \approx \frac{Q_2}{m_2(\bar{\gamma}_3)^N N! B^N} r^{-(p+N+m_2)} \Gamma(p+N+m_2) \quad (3.26)$$

$$I_9 = \frac{1}{\Gamma(m)(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma\left(m, \frac{m\gamma}{\bar{\gamma}_2}\right) \gamma\left(N, \frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_3}\right) d\gamma \quad (3.16)$$

$$I_9 \approx \frac{m^{m-1}}{\Gamma(m)(\bar{\gamma}_2)^m (\bar{\gamma}_3)^N N!} r^{-(p+N+m)} \Gamma(p+N+m) \quad (3.27)$$

$$I_{10} = \frac{Q_1(\zeta_1)^{-m_1}}{\Gamma(m)(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_1, \zeta_1 \gamma) \quad (3.17)$$

$$I_{10} \approx \frac{Q_1 m^{m-1}}{m_1 \Gamma(m) (\bar{\gamma}_2)^m (\bar{\gamma}_3)^N B^N N!} \times r^{-(p+N+m+m_1)} \Gamma(p+N+m+m_1) \quad (3.28)$$

$$\times \gamma\left(m, \frac{m}{\bar{\gamma}_2} \gamma\right) \gamma\left(N, \frac{1}{B\bar{\gamma}_3} \gamma\right) d\gamma$$

$$I_{11} \approx \frac{Q_2 m^{m-1}}{m_2 \Gamma(m) (\bar{\gamma}_2)^m (\bar{\gamma}_3)^N B^N N!} \times r^{-(p+N+m+m_2)} \Gamma(p+N+m+m_2) \quad (3.29)$$

$$I_{11} = \frac{Q_2(\zeta_2)^{-m_2}}{\Gamma(m)(N-1)!} \int_0^\infty \gamma^{p-1} e^{-r\gamma} \gamma(m_2, \zeta_2 \gamma) \quad (3.18)$$

$$\times \gamma\left(m, \frac{m}{\bar{\gamma}_2} \gamma\right) \gamma\left(N, \frac{1}{B\bar{\gamma}_3} \gamma\right) d\gamma$$

Biçiminde yaklaşık olarak türetilir. (3.19)-(3.29) ile verilen  $I_1 - I_{11}$  yaklaşık çözümleri eşitlik (3.7)'de yerine konulursa, ele alınan sistemin  $P_e$  ifadesi elde edilmiş olunur. Böylelikle CDF tabanlı  $P_e$  analizi de tamamlanmıştır.

şeklindedir. (3.8)-(3.18) ile verilen  $I_1 - I_{11}$  integrallerini çözmek için tamamlanmamış Gama fonksiyonunun  $\gamma(w, \phi) \rightarrow \frac{\phi^w}{w}$  [21] bağıntısından ve [19, eşitlik (3.381.4)] ifadesinden yararlanarak

$$I_1 \approx \frac{Q_1}{m_1} r^{-(p+m_1)} \Gamma(p+m_1) \quad (3.19)$$

$$I_2 \approx \frac{Q_2}{m_2} r^{-(p+m_2)} \Gamma(p+m_2) \quad (3.20)$$

$$I_3 \approx \frac{m^{m-1}}{(\bar{\gamma}_2)^m \Gamma(m)} r^{-(p+m)} \Gamma(p+m) \quad (3.21)$$

$$I_4 \approx \frac{Q_1 m^{m-1}}{m_1 (\bar{\gamma}_2)^m \Gamma(m)} r^{-(p+m+m_1)} \Gamma(p+m+m_1) \quad (3.22)$$

$$I_5 \approx \frac{Q_2 m^{m-1}}{m_2 (\bar{\gamma}_2)^m \Gamma(m)} r^{-(p+m+m_2)} \Gamma(p+m+m_2) \quad (3.23)$$

$$I_6 \approx \frac{1}{(\bar{\gamma}_3)^N N! B^N} r^{-(p+N)} \Gamma(p+N) \quad (3.24)$$

$$I_7 \approx \frac{Q_1}{m_1 (\bar{\gamma}_3)^N N! B^N} r^{-(p+N+m_1)} \Gamma(p+N+m_1) \quad (3.25)$$

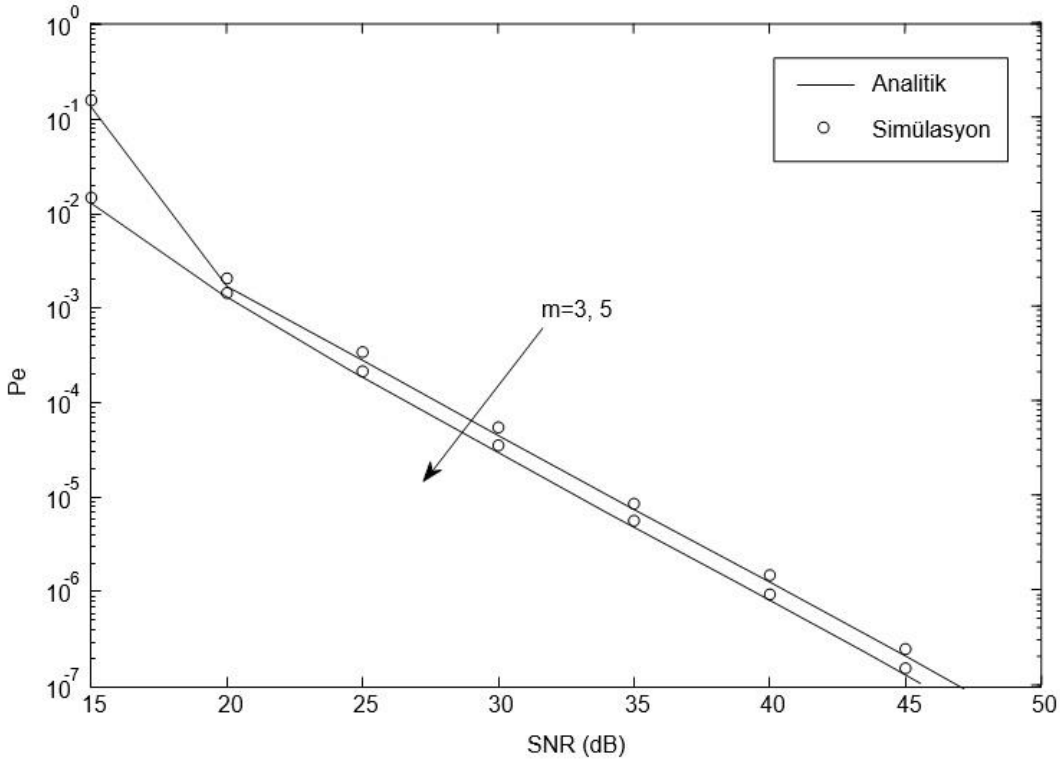
#### 4. NÜMERİK BULGULAR (NUMERICAL RESULTS)

Bu bölümde, (3.19)-(3.29) ile verilen  $I_1 - I_{11}$  türetilimleri (3.7)'de kullanılarak ele alınan sisteme ait  $P_e$  ifadesinin nümerik sonuçları elde edilmiştir. Burada ikili faz-kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying, BPSK) kipleme için sırasıyla  $r=1, p=0.5$  olarak alınmakta iken diferansiyel faz-kaydırmalı anahtarlama (differential phase shift keying, DPSK) için  $r=1, p=1$  olarak alınmaktadır. Ayrıca eşitlik (3.5) kullanılarak yine sisteme ait OP nümerik sonuçları da sunulmuştur. Burada her iletim kanalına ait ortalama SNR'ler birbirine eşit ve yatay eksen olan SNR'nin üçte biridir ( $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_3 = \bar{\gamma} / 3$ ). Türetilen OP ve  $P_e$  ifadeleri Mathematica ve Matlab yazılım programlarında kodlaması yapılmış ve analizlere ait sonuçların nümerik hesaplamalar ile grafikleri oluşturulmuştur.

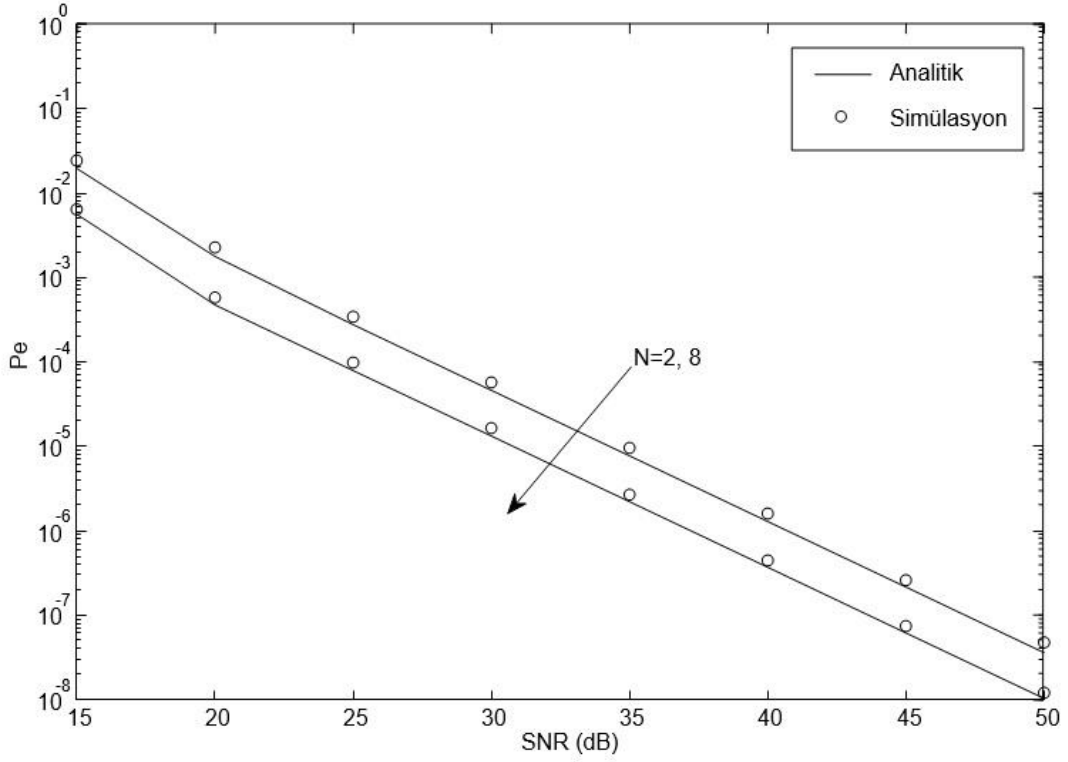
İlk olarak, sistemde  $R_1 - R_2$  arasındaki iletim kanalı olan Nakagami- $m$  sönümlenme parametresini farklı değerleri için bir  $P_e$  kıyaslaması Şekil 2'de sunulmuştur. Burada sistem için  $N=2, r=1, p=1, PI=0.2, m_1=m_2=1.55$  ve  $\sigma=5$  olarak alınmıştır.  $m=3$  ve  $m=5$  olarak alındığında, bilindiği üzere,  $m$  değeri arttıkça Nakagami- $m$  kanalının yıkıcılığı azalmakta buna bağlı olarak performans artmaktadır. Bu durum, Şekil 2'de de net bir şekilde

gözlemlenmektedir. Bir diğer  $P_e$  sonucu Şekil 3'te ise  $N$  yansıtıcı yüzey elemanı sayısı değiştirilmiştir. Burada diğer sistem parametreleri:  $r=1$ ,  $p=1$ ,  $PI=0.2$ ,  $m_1=m_2=1.55$ ,  $m=5$  ve  $\sigma=5$  şeklinde alınmıştır.  $N$  sayısı ise 2 ve 8 olarak değerlendirilmiştir. RIS üzerindeki  $N$  sayısı arttıkça,  $D$  noktasına daha fazla iletim gerçekleştireceğinden sistemin performansının artması beklenmektedir. Buna göre  $N=8$  durumuna ait olan  $P_e$  sonucu,  $N=2$  durumuna ait  $P_e$  sonucuna göre daha üstün bir performans sergilemektedir. Şekil 4'te ise, farklı modülasyon türlerinin  $P_e$  sonuçları kıyaslanmıştır. Burada sistem için  $N=2$ ,  $PI=0.2$ ,  $m_1=m_2=1.55$ ,  $m=2$  ve  $\sigma=5$  olarak alınmış,  $r=1$ ,  $p=1$  (DPSK durumu) ve  $r=1$ ,  $p=0.5$  (BPSK durumu) kıyaslanmıştır. Beklenildiği gibi, şekilden de açıkça görülmektedir ki BPSK durumundaki  $P_e$  sonucunun DPSK durumundaki  $P_e$  sonucuna göre daha üstündür. Bu

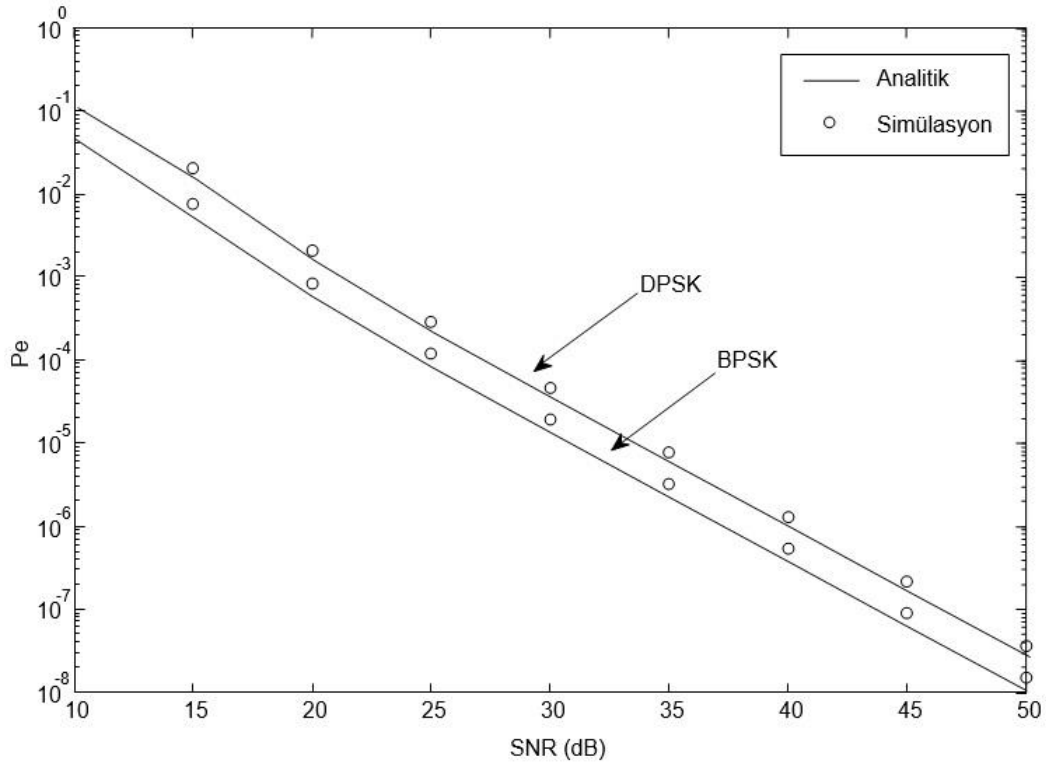
durumda yapılan analizlerin doğruluğu, beklenen durumları sağlayarak gösterilmektedir. Ayrıca önemli bir nokta olarak belirtilmelidir ki, Şekil 2-4'te sunulan sonuçlarda tam simülasyon sonuçları ile analitik sonuçlar birbiri ile aynı trendi göstermektedir. Bu da analitik-simülasyon sonuç çiftlerinin uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Şekil 2-4'te farklı sistem parametreleri için  $P_e$  sonuçları sunulduğundan, bir önceki bölümde CDF yaklaşımı  $P_e$  analizinde yaklaşıklık ile çözüm yapıldığı için tam simülasyon ile analitik sonuçlar arasında küçük de olsa sapmalar mevcuttur. Bu durum beklenen bir durumdur, çünkü  $P_e$  analizinde sonuç ifadesinde yaklaşıklık ile çözümler sunulmuştur. Aslında bu yönden de yapılan analizin doğruluğu bir kez daha görülebilmektedir.



Şekil 2. Farklı Nakagami- $m$  parametresi ile ele alınan sistemin  $P_e$  kıyaslaması. (The comparison of the system under consideration with different Nakagami- $m$  parameters in terms of  $P_e$ ).

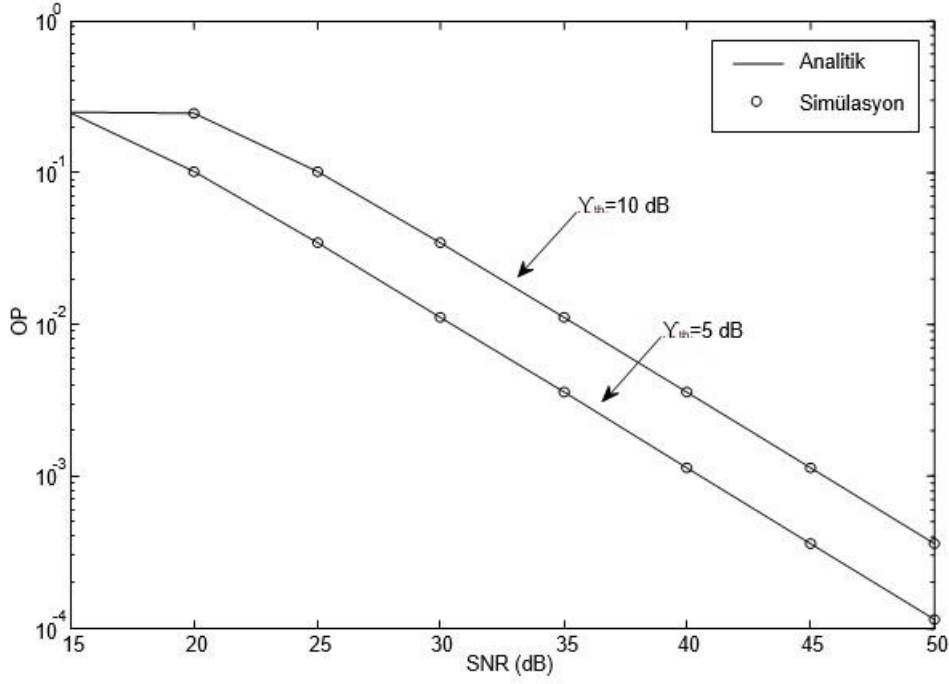


Şekil 3. Farklı  $N$  için  $P_e$  eğrileri kıyaslaması (Comparison of  $P_e$  curves for different values of  $N$ ).



Şekil 4. Farklı modülasyon teknikleri ile  $P_e$  kıyaslaması (Comparison of  $P_e$  for different modulation techniques).





Şekil 5. Farklı eşik değerler ile OP kıyaslaması (Comparison of OP for different threshold values).

Son olarak, bu çalışmada OP analizine ait eğriler Şekil 5'te sunulmuştur. Burada,  $N=4$ ,  $PI=0.2$ ,  $m_1=m_2=1.55$ ,  $\sigma=5$ ,  $m=2$  olarak alınmıştır. Grafikte  $\gamma_{th}$  eşik değeri kıyaslaması sunulmuştur ve  $\gamma_{th}=5$  dB ile  $\gamma_{th}=10$  dB olarak değerlendirilmiştir.  $\gamma_{th}=5$  dB durumu daha iyi bir performansa

sahiptir. Şekil 5'te tam simülasyon sonuçları ile analitik sonuçlar,  $P_e$  sonuçlarındaki gibi herhangi bir yakınsaklık kullanılmadığından mükemmel bir uyum içerisindedir, herhangi bir sapma bulunmamaktadır.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, ilk olarak, PLC içeren RIS destekli bir haberleşme sisteminin CDF ifadesi türetilmiş ve daha sonra türetilen bu CDF ifadesinden yararlanılarak OP ve  $P_e$  ifadeleri elde edilmiştir. Sisteme ait farklı parametre değişimleri ve modülasyon türleri ile çeşitli sonuç grafikleri sunulmuştur. Sunulan sonuçlardan açık bir şekilde görülmektedir ki, bu çalışmada önerilen ifadelerin tam simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu ve beklenen davranışları sergilediği anlaşılmaktadır. Şekil 2-4'te  $P_e$  ifadesindeki yaklaşıklıkta dolayı tam simülasyon sonuçlarına göre küçük de olsa bir sapma göstermektedir. Ancak bu durum Şekil 5 mevcut değildir. Bu çalışmanın devamı olarak gelecek çalışmalarda, röleler arasındaki kanalların farklı sönümlü modeller şeklinde alınması, yüksek dereceden modülasyon tekniklerinin kullanılması, farklı kapasite analizlerinin yapılması ele alınabilir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma 1919B012300783-2209-A kodlu TÜBİTAK projesi ile desteklenmektedir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Beren TİDİN:** Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiş, sonuçları bulmada detaylı araştırmalar yapmıştır.

**Mehmet BİLİM:** Makalenin yazım işleminde düzeltmeler yapmış, sistem modelini oluşturmuş, sistem analizlerini gerçekleştirmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Zeng, H. Zhang, B. Di, Z. Han and L. Song, 'Reconfigurable intelligent surface (RIS) assisted wireless coverage extension: RIS orientation and location optimization', *IEEE*

- Communications Letters*, 25:1, (2021), 269-273. doi: 10.1109/LCOMM.2020.3025345
- [2] E. Basar, 'Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: a new beyond MIMO paradigm for 6G', *IEEE Transactions on Communications*, 68:5, (2020), 3187-3196. doi: 10.1109/TCOMM.2020.2971486.
- [3] N. S. Perović, L. -N. Tran, M. Di Renzo and M. F. Flanagan, 'Achievable rate optimization for MIMO systems with reconfigurable intelligent surfaces', *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20:6, (2021), 3865-3882. doi: 10.1109/TWC.2021.3054121.
- [4] R. Long, Y. -C. Liang, Y. Pei and E. G. Larsson, 'Active reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications', *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20:8, (2021), 4962-4975. doi: 10.1109/TWC.2021.3064024.
- [5] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M. -S. Alouini and R. Zhang, 'Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces', *IEEE Access*, 7, (2019), 116753-116773, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935192.
- [6] S. Ma, H. Guo, Y. Zhang, Y. Fang and D. Yuan, 'Joint beamforming and reflecting design in reconfigurable intelligent surface-aided multi-user communication systems', *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20:5, (2021), 3269-3283. doi: 10.1109/TWC.2020.3048780.
- [7] K. Asmoro, I. N. A. Ramatryana and S. Y. Shin, 'Reconfigurable intelligent surface-assisted NOMA with coordinate reflector interleaving under Rician fading channel', *IEEE Access*, (2024), doi: 10.1109/ACCESS.2024.3380354. (Early Access)
- [8] A. M. Salhab and L. Yang, 'Mixed RF/FSO relay networks: RIS-equipped RF source vs RIS-aided RF source', *IEEE Wireless Communications Letters*, 10:8, (2021), 1712-1716. doi: 10.1109/LWC.2021.3077960
- [9] M Bilim, 'Performance analysis of RIS-Assisted wireless networks in the presence of imperfect phase errors', *AEU-International Journal of Electronics and Communications* 171, (2023), 154923, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154923>.
- [10] J. Du, Y. Cheng, L. Jin, S. Li and F. Gao, 'Nested tensor-based integrated sensing and communication in RIS-assisted THz MIMO systems', *IEEE Transactions on Signal Processing*, 72, (2024), 1141-1157. doi: 10.1109/TSP.2024.3359323.
- [11] A. Tonello, F. Versolatto, and A. Pittolo, 'In-home power line communication channel: statistical characterization', *IEEE Transactions on Communications*, 62:6, (2015), 2096-2106. doi: 10.1109/TCOMM.2014.2317790.
- [12] Y. Kabalci, '5G mobile communication systems: Fundamentals, challenges, and key technologies', in *Smart Grids and Their Communication Systems*, Springer, (2019), 329-359. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-1768-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-13-1768-2_10)
- [13] M. Jani, P. Garg, and A. Gupta, 'Performance analysis of a mixed cooperative PLC-VLC system for indoor communication systems', *IEEE Systems Journal*, 14:1, (2020) 469-476. doi: 10.1109/JSYST.2019.2911717.
- [14] S. Galli and T. Banwell, 'A novel approach to the modeling of the indoor power line channel-Part II: transfer function and its properties', *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20:3, (2005), 1869-1878. doi: 10.1109/TPWRD.2005.848732.
- [15] F. J. Canete, J. A. Cortés, L. Díez and J. T. Entrambasaguas, 'A channel model proposal for indoor power line communications', *IEEE Communications Magazine*, 49:12, (2011) 166-174. doi: 10.1109/MCOM.2011.6094022.
- [16] M. Bilim, 'Dual-hop communications over PLC/ $\eta$ - $\mu$  and PLC/ $\lambda$ - $\mu$  fading channels', *International Journal of Electronics*, 110:12, (2023), 2317-2339 doi: <https://doi.org/10.1080/00207217.2022.2145502>.
- [17] L. Yang, et al., 'Accurate closed-form approximations to channel distributions of RIS-aided wireless systems', *IEEE Wireless Communications Letters*, 9:11, (2020), 1985-1989. doi: 10.1109/LWC.2020.3010512.
- [18] A. K. Padhan, H. K. Sahu, P. R. Sahu and S. R. Samantaray, 'RIS assisted dual-hop mixed PLC/RF for smart grid applications',

*IEEE Communications Letters*, 25:11, (2021),  
3523-3527. doi:  
10.1109/LCOMM.2021.3104630.

- [19] I. Gradshtein and I. M. Ryzhik, 'Table of integrals, series, and products Academic press, 2000. doi: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-64839-5>.
- [20] I. S. Ansari et al., 'A new formula for the BER of binary modulations with dual-branch selection over generalized- $K$  composite fading channels', *IEEE Trans. Commun.*, 59:10, (2011), 2654–2658. doi: 10.1109/TCOMM.2011.063011.100303A.
- [21] M Bilim, 'A performance study on diversity receivers over  $\kappa$ - $\mu$  shadowed fading channels', *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 112, (2019), 152934. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.152934>.

ERKEN GÖRÜNÜM