

Araştırma Makalesi-Research Article

SQAM Kullanan Bina-İçi Enerji Hattı İletişim Sistemleri Üzerine Bir Analiz

An Analysis on Indoor Power Line Communication Systems Using SQAM

Ömer Faruk Akdemir¹, Mehmet Bilim^{2*}

Geliş / Received: 18/07/2022

Revize / Revised: 01/12/2022

Kabul / Accepted: 01/12/2022

ÖZ

Bu çalışma, enerji hattı haberleşmesi (power line communication, PLC) sağlayan bağlantılar için kare dördün genlik modülasyonu (square quadrature amplitude modulation, SQAM) ile performans analizini sunmaktadır. Yapılan analizde, ele alınan sistem modeline ait alıcı uçtaki anlık işaret gücü oranının (signal to noise ratio, SNR) olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) kullanılmıştır. Analizler sonucunda yaklaşık bir hata ifadesi türetilmiştir. Türetilen hata ifadesi yardımıyla, sistem parametrelerinin değişimlerinin hata performansına olan etkileri incelenmiştir. Verilen eğrilerde, analitik sonuçlar ile tam nümerik (simülasyon) sonuçlarının birbiriyle uyumlu olması yapılan analizin doğruluğunu onaylamaktadır.

Anahtar Kelimeler- Enerji Hattı Haberleşmesi, Kare Dördün Genlik Kipleme, Hata Performansı

ABSTRACT

This paper presents the performance analysis with square quadrature amplitude modulation for powerline communication links. In the analysis, the probability density function (PDF) of the instantaneous signal-to-noise ratio (SNR) at the end of receiver for the system model under consideration was used. As a result of the analysis, an approximate error expression was derived. With the help of the derived error expression, the effects of the changes in the system parameters on the error performance are examined. In the error curves, the compatibility of the analytical results with the exact numerical (simulation) results confirms the accuracy of the analysis.

Keywords- Power Line Communication, Square Quadrature Amplitude Modulation, Error Performance

¹İletişim: omerfarukakdemir@outlook.com (<https://orcid.org/0000-0003-0962-8198>)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: mbilim@nny.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2518-3125>)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kayseri, Türkiye

I. GİRİŞ

Enerji iletim haberleşmesi (power line communication, PLC), hali hazırda şebeke bağlantılarını kullanması ve yapay zeka destekli iletişim mimarisinde yoğun bir şekilde kullanılacağı öngörülmesi sebebiyle son dönemlerde oldukça popüler bir konu olmuştur [1]. Bundan dolayı araştırmacılar, PLC ile ilgili bazı güncel çalışmalar ile literatüre katkıda bulunmuşlardır [2-13]. [2]'deki sunulan çalışmada, fiziksel katman güvenliği ve kanal gürültü cevabının çok seviyeli niceleme ile birlikte PLC konuları ele alınmıştır. [3]'teki yazarlar, kaskat H köprülü dönüştürücüler ile PLC sistemlerinde eş zamanlı güç ve dijital veri iletiminin detaylarını açıklamışlardır. Güvenilir düşük veri hızlı PLC sistemleri için dağılmış yük kontrol tekniğinin detayları [4]'teki çalışmada verilirken, PLC sistemleri için fiziksel katmanlı gizli anahtar oluşturma yöntemi [5]'te sunulmaktadır. İki atlamalı karma PLC/RF iletim sistemlerinin performans analizlerinin adımları ve elde edilen ifadeler ile ilgili sonuçlar, [6]'daki çalışmada verilmektedir. Dikgen olmayan çoklu erişim sistemlerini kullanan PLC sistem modeline ait gizlilik kesinti analizi [7]'de gerçekleştirilmiştir. Çok-girişli çok-çıkışlı PLC sistemlerinde dikgen frekans bölmeli çoğullamanın uzay zamanlı paralel taşıyıcılar arası girişimini bastırmanın bit hata oranı performansı [8]'deki çalışmada sunulmaktadır. [9]'daki çalışmada ise PLC kanal modeline ait yeni bir matematiksel tanımlama ve bu tanımlama kullanılarak görünür ışık haberleşmesinin iki atlamalı bir biçimde PLC sistemleri ile kullanımına ait performans analizleri verilmiştir. [10]'daki çalışmada ise dürtüsel gürültünün etkisini PLC sistemlerinde azaltmak için ön kodlama işleminin kullanılabilirliği izah edilirken, [11]'de verilen çalışmada ise PLC sistemlerinde çapraz dördün genlik modülasyonunun (cross quadrature amplitude modulation, XQAM) performansı incelenmiştir. [12]'de, yazarlar üç düğümlü ve iki yollu röle destekli bir PLC sistemi için güç optimizasyonu ele almışlardır. [13]'te sunulan çalışmada, kırmık yayma spektrumlu modülasyon çeşidinin PLC sistemlerinde sergilemiş olduğu performans sunulmaktadır.

Öte yandan veri hızı haberleşmede önemli bir kıstas olup, sistem performansı açısından kritik bir yere sahiptir. Bunun için kare dördün genlik modülasyonu (square quadrature amplitude modulation, SQAM) iyi bir çözüm olup, farklı sistem modellerinde kullanılabilir [14-17]. Bundan dolayı PLC sistemleri için SQAM analizi [9]'da önerilen kanal modeli kullanılarak literatürde, yazarların bildiği kadarıyla, sunulmamıştır. Literatür taramasında bu çalışmada sunulan benzer şekilde herhangi bir SQAM analizi [9]'daki kanal modelini kullanarak PLC sistemlerinde yapılmamıştır. Bu noktadan hareketle, literatürdeki bu eksiklik yazarlar tarafından bu çalışma ile katkı sağlanarak giderilmeye çalışılmaktadır. Tek-girişli tek-çıkışlı (single-input single-output, SISO) bir PLC sistemin SQAM tekniği ile hata analizi alıcı uçtaki anlık işaret gürültü oranının (signal to noise ratio, SNR) olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Yapılan analiz sonucunda yaklaşık bir hata ifadesi elde edilmiş olup, türetilen yaklaşık hata ifadesine bağlı olarak bazı hata eğrileri nümerik sonuçlar bölümünde sunulmuştur. Farklı sistem parametreleri ve tam nümerik (simülasyon) sonuçları ile bu sonuç grafikleri verilmiştir.

II. SİSTEM VE KANAL MODELLERİ

Bu çalışmada, SISO yapıya sahip bir bina-içi PLC sistemi ele alınmaktadır. Burada sistem modeli, mevcut bina-içi enerji hatlarını kullandığından herhangi bir ek masrafa ihtiyaç duymadan kanal ortamı hazırdır. Bina-içi enerji hatları için literatürde farklı kanal modelleri önerilmiştir. Ancak bu modeller arasında [9]'daki kanal modeli son zamanlarda güncel olarak önerilmiştir ve popüler bir kanal modelidir. Bu sebeple, bu makalede bina-içi SISO PLC şeması için [9]'da önerilen modelin kullanılması tercih edilmiştir. Buna göre, ele alınan sistem için alıcı uçta anlık SNR'nin PDF ifadesi şu şekildedir [9]:

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

Burada

$$Q_1 = (1 - PI) U_1 \quad (2)$$

$$Q_2 = PI U_2 \quad (3)$$

$$U_1 = \frac{(\zeta_1)^{m_1}}{\Gamma(m_1)} \quad (4)$$

$$U_2 = \frac{(\zeta_2)^{m_2}}{\Gamma(m_2)} \quad (5)$$

$$\zeta_1 = m_1 / \Omega_1 \quad (6)$$

$$\zeta_2 = m_2 / \Omega_2 \quad (7)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. PI impuls etkili gürültü (impulsive noise, IN) olasılığını belirtmekte ve $PI = \lambda T$ 'dir. λ şemadaki saniyelik birimi, T IN'ye ait zamanı tanımlamaktadır. $\Gamma(\cdot)$ Gama fonksiyonu, m_1 ve m_2 ele alınan sistemdeki kanalın gölgeleme parametreleridir. $m_1 = (e^{(\sigma_1)^2} - 1)^{-1}$ ve $m_2 = (e^{(\sigma_2)^2} - 1)^{-1}$ olarak formüle edilmektedir. Burada $\sigma_1 = \sigma_2 = 2\tau$ şeklinde belirtilirken, τ kanal katsayısı olan h değerinin ortalamasıdır. Ω_1 ve Ω_2 ise güç ifadelerine ait ortalamalardır ve $\Omega_1 = e^{\tau_1} \sqrt{((1+m_1)/m_1)}$, $\Omega_2 = e^{\tau_2} \sqrt{((1+m_2)/m_2)}$ biçiminde tanımlanmaktadır. Ayrıca $\tau_1 = 2\tau + \ln \bar{\gamma}_1$, $\tau_2 = 2\tau + \ln \bar{\gamma}_2$ şeklinde ifade edilirken $\bar{\gamma}_1$ yalnızca arka plan gürültü (background noise, BN) durumundaki SNR'nin ortalamasıdır ve $\bar{\gamma}_1 = \frac{E_b}{\sigma_G^2}$ biçiminde ifade edilmektedir. E_b işaret enerjisine ait bilgiyi ve σ_G^2 toplam gürültü varyans tanımlamasını ifade etmektedir. $\bar{\gamma}_2$ ise IN ve BN etkilerinin her ikisi de var iken ortalama SNR'yi tanımlamaktadır ve $\bar{\gamma}_2 = \frac{E_b}{(o+1)\sigma_G^2}$ biçimindedir. $\bar{\gamma}_2$ ifadesinde $o = \frac{\sigma_I^2}{\sigma_G^2}$ biçiminde olup, σ_I^2 ise IN'nin varyansını belirtmektedir [9]. Bu çalışmada PDF temelli hata performans incelemesi yapılacağından denklem (1)'deki PDF ve devamındaki tanımlamalardan faydalanılacaktır. Böylelikle, literatürde ilk kez, [9]'daki PLC kanal modeli kullanılarak SQAM hata analizinin bu çalışma ile yapılması hedeflenmektedir.

III. HATA ANALİZİ

Bu bölümde, SISO PLC bir sistemin SQAM hata analizi, PDF temelli yaklaşım ile gerçekleştirilmektedir. Buradan hareketle

$$P_e = \int_0^{\infty} p(e|\gamma) f_{\gamma_{PLC}}(\gamma) d\gamma \quad (8)$$

olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (8)'deki integralin $p(e|\gamma)$ ve $f_{\gamma_{PLC}}(\gamma)$ sırasıyla koşullu hata olasılığı ve PDF ifadesi olmak üzere iki adet bileşeni mevcuttur. Burada PDF ifadesi, eşitlik (1)'de verilmiştir. SQAM için $p(e|\gamma)$ ifadesi [14]

$$p(e|\gamma) = 4\Delta Q(\sigma\sqrt{\gamma}) - 4\Delta^2 Q^2(\sigma\sqrt{\gamma}) \quad (9)$$

biçiminde tanımlanmaktadır. Burada $Q(\cdot)$, Gauss fonksiyonudur ve $Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$ olarak ifade edilmektedir. $Q(x)$ 'teki $\operatorname{erfc}(\cdot)$, hata fonksiyonudur. Eşitlik (9) için $\Delta = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)$ ve $\sigma = \sqrt{\frac{3}{M-1}}$ biçiminde olup, M modülasyon seviyesidir. Eşitlik (9)'daki koşullu hata ifadesi, hata fonksiyonu cinsinden şu şekilde yazılabilir:

$$p(e|\gamma) = 2\Delta \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) - \Delta^2 \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) \right) \quad (10)$$

Eşitlik (10) veya (9) ile verilen ifadelerden biri ve eşitlik (1), eşitlik (8)'de yerine yazılırsa

$$P_{e_SQAM} = \int_0^{\infty} \left[2\Delta \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) - \Delta^2 \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma\sqrt{\gamma}}{\sqrt{2}}\right) \right) \right] \left[Q_1 \gamma^{m_1-1} e^{-\zeta_1 \gamma} + Q_2 \gamma^{m_2-1} e^{-\zeta_2 \gamma} \right] d\gamma \quad (11)$$

$$P_{e_SQAM} = \int_0^{\infty} \left[4\Delta Q(\sigma\sqrt{\gamma}) - 4\Delta^2 Q^2(\sigma\sqrt{\gamma}) \right] \left[Q_1 \gamma^{m_1-1} e^{-\zeta_1 \gamma} + Q_2 \gamma^{m_2-1} e^{-\zeta_2 \gamma} \right] d\gamma$$

elde edilir. Eşitlik (11)'de verilen ifadeleri çözüme kavuşturmak matematiksel açıdan oldukça zahmetlidir. Bu sebeple, literatürde sıklıkla başvurulan $Q(\cdot)$ 'li terimler için üst sınır yaklaşımı yönteminden faydalanılmaktadır. Literatürde en temel ve kullanımı yaygın olan üst sınır yaklaşımlarından bir tanesi Chernoff yaklaşıklığıdır. Bu sebeple bu yaklaşıklık

$$Q(x) \approx \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}x^2} \quad (12)$$

olarak tanımlanmaktadır [18]. Bu yaklaşıklık birçok çalışmada kullanılmıştır [15-17]. Buna göre, eşitlik (9)'daki $p(e|\gamma)$ ifadesindeki $Q(\cdot)$ 'li terimler sırasıyla şu şekilde yazılabilir:

$$Q(\sigma\sqrt{\gamma}) \approx \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}\sigma^2\gamma} \quad (13)$$

$$Q^2(\sigma\sqrt{\gamma}) \approx \frac{1}{4} e^{-\sigma^2\gamma} \quad (14)$$

Buradan hareketle, eşitlik (13) ve (14), eşitlik (9)'da yerine konulursa

$$p(e|\gamma) \approx 2\Delta e^{-\frac{1}{2}\sigma^2\gamma} - \Delta^2 e^{-\sigma^2\gamma} \quad (15)$$

olarak yeniden elde edilir. Eşitlik (15) ve (1), (8)'de yerine yazılırsa

$$P_{e_SQAM} \approx \int_0^{\infty} \left[2\Delta e^{-\frac{1}{2}\sigma^2\gamma} - \Delta^2 e^{-\sigma^2\gamma} \right] \left[Q_1 \gamma^{m_1-1} e^{-\zeta_1 \gamma} + Q_2 \gamma^{m_2-1} e^{-\zeta_2 \gamma} \right] d\gamma \quad (16)$$

elde edilir. Eşitlik (16) yeniden düzenlendiğinde

$$P_{e_SQAM} \approx 2\Delta Q_1 J_1 - \Delta^2 Q_1 J_2 + 2\Delta Q_2 J_3 - \Delta^2 Q_2 J_4 \quad (17)$$

olarak yazılabilmektedir. Q_1 ve Q_2 eşitlik (2) ve (3)'te tanımlanmıştır. Burada

$$J_1 = \int_0^{\infty} \gamma^{m_1-1} e^{-\gamma\left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_1\right)} d\gamma \quad (18)$$

$$J_2 = \int_0^{\infty} \gamma^{m_1-1} e^{-\gamma(\sigma^2 + \zeta_1)} d\gamma \quad (19)$$

$$J_3 = \int_0^{\infty} \gamma^{m_2-1} e^{-\gamma\left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_2\right)} d\gamma \quad (20)$$

$$J_4 = \int_0^{\infty} \gamma^{m_2-1} e^{-\gamma(\sigma^2 + \zeta_2)} d\gamma \quad (21)$$

biçimindedir. Eşitlik (18)-(21)'de verilen integraller bir adet polinom ve bir adet üstel terim içermektedir. Bu integrallerin çözümü [19, eşitlik (3.381.4)] ifadesi kullanılarak elde edilebilmektedir. Böylelikle

$$J_1 = \left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_1 \right)^{-m_1} \Gamma(m_1) \quad (22)$$

$$J_2 = (\sigma^2 + \zeta_1)^{-m_1} \Gamma(m_1) \quad (23)$$

$$J_3 = \left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_2\right)^{-m_2} \Gamma(m_2) \quad (24)$$

$$J_4 = (\sigma^2 + \zeta_2)^{-m_2} \Gamma(m_2) \quad (25)$$

olarak elde edilir. Burada $\Gamma(\cdot)$ Gama fonksiyonudur [19]. Eşitlik (22)-(25)'de verilen ifadeler eşitlik (17)'de yerine konulursa

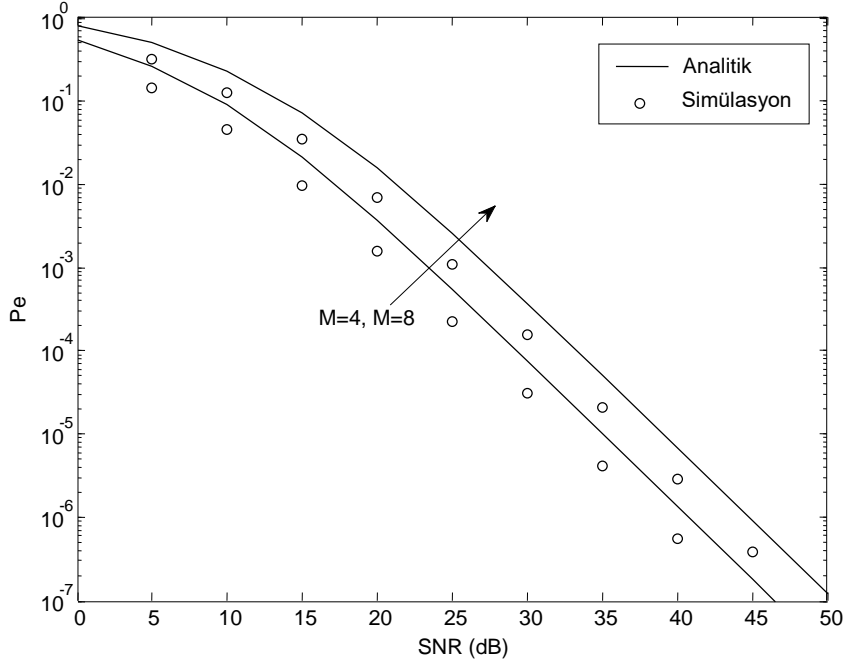
$$P_{e_SQAM} \approx 2\Delta Q_1 \left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_1\right)^{-m_1} \Gamma(m_1) - \Delta^2 Q_1 (\sigma^2 + \zeta_1)^{-m_1} \Gamma(m_1) \\ + 2\Delta Q_2 \left(\frac{1}{2}\sigma^2 + \zeta_2\right)^{-m_2} \Gamma(m_2) - \Delta^2 Q_2 (\sigma^2 + \zeta_2)^{-m_2} \Gamma(m_2) \quad (26)$$

şeklinde türetilir.

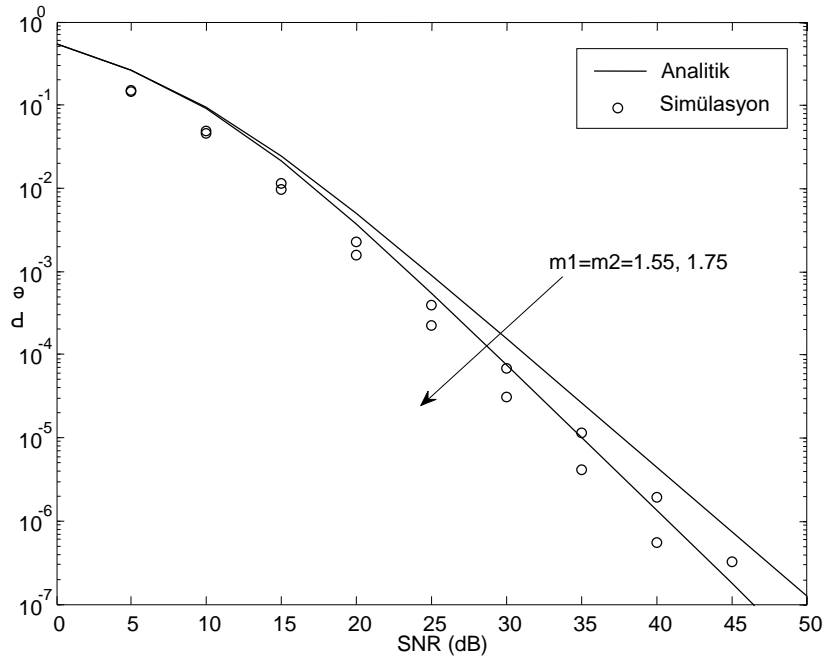
IV. BULGULAR

Bu bölümde, SQAM kullanan bir SISO bina-içi PLC sistemin hata analizleri ile ilgili çeşitli hata performans eğrileri sunulmaktadır. Bir önceki bölümde yapılan analiz sonucunda türetilen yaklaşık hata ifadesinin doğruluğu tam nümerik bilgisayar simülasyonları ile kıyaslamalı olarak verilerek izah edilmektedir. İlk grafik olan Şekil 1'de sistem parametreleri şu şekildedir: $m_1 = m_2 = 1.75$, $PI = 0.2$ ve $o = 5$. Şekil 1'de farklı M seviyelerinin hata performansına olan etkisi incelenmektedir. Burada M seviyesi arttıkça performansın literatüre uygun bir şekilde azaldığı görülmektedir. Buradaki sisteme rakip olabilecek literatürdeki çalışmalardan [11]'de sunulan çalışma dikkate alındığında, PLC sistemlerine XQAM uygulamasının yapıldığı görülmektedir. XQAM için [11]'de verilen Şekil 1'deki farklı XQAM seviyeli modülasyonlar için verilen performans eğrilerinden burada sunulan eğrilerin daha iyi olduğu görülmektedir. Örnek vermek gerekirse, 10^{-3} 'lük bir hata performansı için [11]'deki sistemde yaklaşık 28 ve 34 dB'lik SNR gerekli iken, buradaki sistemde ise yaklaşık 21 ve 26 dB'lik SNR gerekmektedir. Bu durum ise bu çalışmada sunulan sistem modelinin [11]'deki sistem modeline göre yaklaşık 7-8 dB'lik kazancının olduğunu göstermektedir. Bir diğer sonuçta ise PLC kanalları için gölgeleme parametre değerlerinin etkisi incelenmektedir. Burada sistem için gerekli olan parametreler şu şekilde ayarlanmıştır: $M=4$, $PI = 0.2$ ve $o = 5$. Şekil 2'den de görüldüğü üzere, $m_1 = m_2 = 1.55$ 'ten $m_1 = m_2 = 1.75$ 'e arttırıldığında hata performansı iyileşmektedir. Bunun da sebebi, PLC kanal ortamındaki şartların gölgeleme parametresinin artmasıyla birlikte iyileşmesidir. Bu sebeple, hata performansı özellikle 15 dB sonrasında $m_1 = m_2 = 1.75$ olduğu durumda $m_1 = m_2 = 1.55$ olduğu duruma kıyasla, daha belirgin bir şekilde iyileştiği görülmektedir. İncelenen son analiz sonuçları da Şekil 3'te verilmektedir.

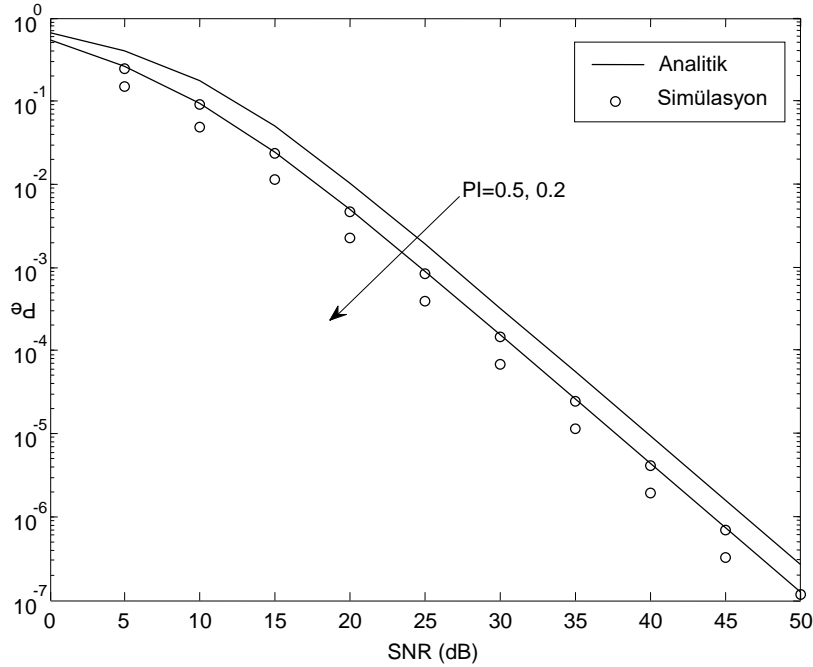
Şekil 3 için SISO bina-içi PLC sistemin parametre ayarlamaları $m_1 = m_2 = 1.55$, $M=4$ ve $o = 5$ biçimindedir. Burada IN'in oluşma olasılığı olan PI parametresinin değişiminin sistem performansına olan etkisi incelenmiştir. $PI=0.5$ olduğu durum ile $PI=0.2$ olduğu durum kıyaslandığında 0.5 olduğu durumun beklenildiği gibi daha kötü olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü, IN durumunun 0.5 olasılıkla oluşma durumu 0.2 olasılıkla oluşma durumuna göre daha fazladır. Bu da IN'in olumsuz etkisinin ele alınan sistem üzerinde gösterdiği bir netice olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 1. SISO Bina-İçi PLC Bir Sistemin Farklı M Seviyesi İçin Hata Performans Eğrileri



Şekil 2. SISO Bina-İçi PLC Bir Sistemin Farklı Gölgeleme Parametreleri İçin Hata Performans Eğrileri



Şekil 3. SISO Bina-İçi PLC Bir Sistemin Farklı PI Değerleri İçin Hata Performans Eğrileri

Şekil 1-3'te verilen sonuçların hepsinde, analitik ile nümerik tam simülasyon sonuçlarının benzer bir trend ve iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Yapılan analizde, hata ifadesi türetilirken Chernoff üstel üst sınır yaklaşımı kullanılmıştır. Bu sebeple, analitik sonuçlar tam nümerik simülasyon sonuçlarının üst tarafından yaklaşım göstermektedir. Bu durum da ayrıca yapılan analizin doğruluğunu farklı bir açıdan ortaya koymaktadır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışma, SISO bir PLC sistemin SQAM kullanılması durumunda hata analizini sunmaktadır. Sunulan hata analizinde PDF temelli yaklaşım kullanılmış, yaklaşık bir hata ifadesi elde edilmiştir. Bütün nümerik sonuçlardaki analitik sonuçlar, elde edilen yaklaşık hata ifadesinden faydalanılarak elde edilmiştir. PLC sistemindeki ve SQAM modülasyonundaki farklı parametre değişimleri ile farklı hata performansları gösterilmeye çalışılmıştır. Sunulan bütün sonuçlarda, analitik sonuçlar ile tam nümerik (simülasyon) sonuçlarının iyi bir uyum içerisinde olduğunu söylemek mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] Kabalcı, Y. (2016). A Survey On Smart Metering and Smart Grid Communication, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 302-318.
- [2] HernandezFernandez, J. Omri A. & Pietro, R. D. (2022). Channel Impulse Response Multi Level Quantization for Power Line Communications, *IEEE Access*, 10, 66113-66126.
- [3] Mandourarakis, I. Koutroulis E. & Karystinos, G. N. (2022). Power Line Communication Method for The Simultaneous Transmission Of Power and Digital Data by Cascaded *H*-Bridge Converters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37, 10, 12793-12804.
- [4] Aderibole, A. O. Kircher, K. J. Leeb S. B. & Norford, L. K. (2022). Distributed Load Control Using Reliable Low-Data-Rate Power Line Communication, *IEEE Access*, 10, 50242-50253.
- [5] Zhang, J. Liu, X. Cui Y. & Xu, D. (2022). Physical-Layer Secret Key Generation in Power Line Communication Networks, *IEEE Access*, 10, 48539-48550.
- [6] Yang, L. Yan, X. Li, S. da Costa D. B. & Alouini, M. -S. (2022). Performance Analysis of Dual-Hop Mixed PLC/RF Communication Systems, *IEEE Systems Journal*, 16, 2, 2867-2878.
- [7] Ahiadormey, R. K. Anokye, P. Jo, H. -S. Song C. & Lee, K. -J. (2021). Secrecy Outage Analysis in NOMA Power Line Communications, *IEEE Communications Letters*, 25, 5, 1448-1452.

- [8] Fadaei Tehrani, A. YehH. -G. & Kwon,S. -C. BER Performance of Space–Time Parallel ICI Cancellation of OFDM in MIMO Power Line Communications, *IEEE SystemsJournal*, 15, 2, 1742-1752.
- [9] Jani,M. GargP. & Gupta,A. (2020). Performance Analysis of a Mixed Cooperative PLC–VLC System for Indoor Communication Systems, *IEEE SystemsJournal*, 14, 1, 469-476.
- [10] Ge H., Sun S., Dai X. & Tian H., (2022). Mitigating the Effect of Impulsive Noise in Power Line Communications with Preprocessing, 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC), 2022, pp. 462-465.
- [11] Akdemir O.F. & Bilim M., (2022). Indoor Power Line Communication with XQAM Signaling, 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2022, pp. 1-4.
- [12] Liong A.G.A., Gopal L., RongY., Juwono F. H. & Chiong C.W.R., Power Optimization of a Three-Node Two-Way Relay-Assisted Power-Line Communication System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022. (accepted for publication)
- [13] Robson S. & Haddad, M. A Chirp Spread Spectrum Modulation Scheme for Robust Power Line Communication, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022 (accepted for publication).
- [14] Sathwani D. (2018). Simple and Tightly Approximated Integrals over κ - μ Shadowed Fading Channel With Applications. *IEEE Trans VehTechnol.* 67, 10, 10092-10096.
- [15] Bilim M. & Kapucu,N. (2019).Average Symbol Error Rate Analysis of QAM Schemes Over Millimeter Wave Fluctuating Two-Ray Fading Channels, *IEEE Access*, 7, 105746-105754.
- [16] Bilim M. (2019). QAM Signaling over κ - μ Shadowed Fading Channels, *Physical Communication*, 34, 261-271.
- [17] Bilim M. (2021). Different QAM Schemes Analyses for ARS Fading Channels, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32, 1, e4119.
- [18] Wozencraft J. M. and JacobsI. M. (1965). *Principles of Communication Engineering*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 83.
- [19] Gradshteyn, I. S., & Ryzhik, I. M. (2007). *Tables of Integrals, Series and Products*, 7th ed., San Diego, CA:Academic.