



Theoretical Derivation of Effective Channel Capacity Expression for Beaulieu-Xie Shadowed Fading Channels

Mehmet BİLİM¹ Yasin KABALCI^{2,*}

¹Nuh Naci Yazgan University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 38170, Kocasinan/KAYSERİ

²Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 51240, Merkez/NİĞDE

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effective channel capacity analysis of a single input single output system over Beaulieu-Xie shadowed is presented.

Article Info:

Research article
Received: 3.08.2022
Revision: 27.08.2022
Accepted: 29.08.2022

Highlights

- Beaulieu-Xie.
- Shadowed.
- Effective channel capacity.

Keywords

Communication system
SISO
Effective channel capacity
Beaulieu-Xie. Shadowed
fading channel.

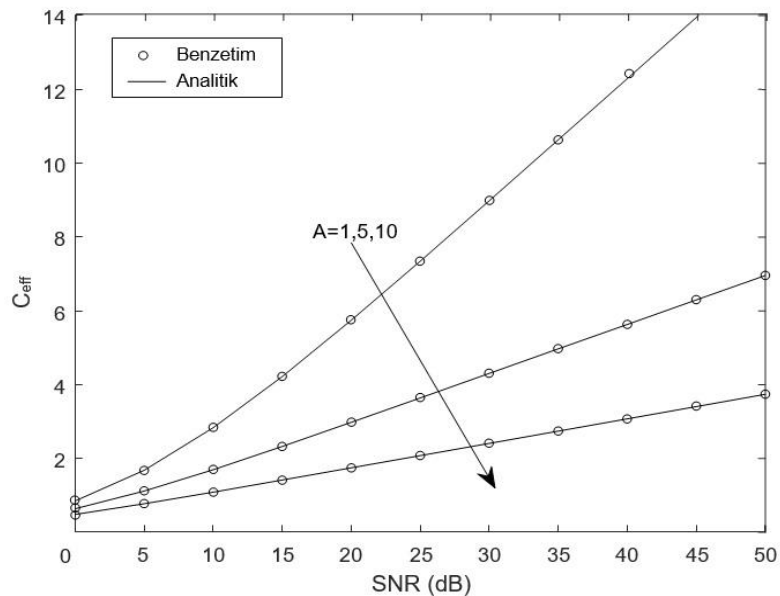


Figure A. Effective channel capacity comparison of the considered system for different A values.

Purpose: One of the main purposes of this study is to propose the effective channel capacity expression in a different channel fading called the Beaulieu-Xie shadowed and to show the channel capacity performance of traditional communication systems with this derived expression.

Theory and Methods: The closed-form effective channel capacity expression is derived by employing the probability density function of the the Beaulieu-Xie shadowed. For the derivations, some summation expansions and Meijer's G function transformations are used.

Results: By using the derived effective channel capacity expression, the effective channel capacity performance evaluations are presented for different fading parameter values, average signal-to-noise ratio values, A values and shading parameter values. In all results, it is aimed to show the correctness of the proposed expression by giving the theoretical results and exact numerical simulation results.

Conclusion: In this study, for the first time in the literature, the expression of effective channel capacity of a single input single output wireless communication system is derived. By providing mathematical operations in these derivations, the accuracy of the derivations is shown in comparison with the exact simulations. Various results are given with different parameter values in the considered system.



Theoretical Derivation of Effective Channel Capacity Expression for Beaulieu-Xie Shadowed Fading Channels

Mehmet BİLİM¹ Yasin KABALCI^{2,*}

¹Nuh Naci Yazgan University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 38170, Kocasinan/KAYSERİ

²Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 51240, Merkez/NİĞDE

Abstract

This study presents the effective channel capacity (C_{eff}) analysis for a communication system in which the line between transmitter and receiver has a single path including Beaulieu-Xie shaded (BX-shadowed, BX-S) fading. In the study, the C_{eff} expression is theoretically derived, and the probability density function (PDF) of BX-S fading is used for the derivations. The accuracy of the C_{eff} expression is tried to be demonstrated with computer simulations, and various scenarios are examined with different parameter changes.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 3.08.2022
Düzeltilme: 27.08.2022
Kabul: 29.08.2022

Keywords

Communication System
Effective Channel
Capacity
Beaulieu-Xie Shadowed
Fading Channel

Anahtar Kelimeler

Haberleşme Sistemi
Etkel Kanal Kapasitesi
Beaulieu-Xie Gölgelemeli
Sönümlü Kanal

Beaulieu-Xie Gölgelemeli Sönümlü Kanallar İçin Etkel Kanal Kapasite İfadesinin Kuramsal Türetimi

Öz

Bu çalışma, alıcı-verici arasındaki hattın tek ve Beaulieu-Xie gölgelemeli (BX-shadowed, BX-S) sönümlenmeye sahip olduğu bir sistem için etkel kanal kapasitesi (effective channel capacity, C_{eff}) analizini sunmaktadır. Çalışmada C_{eff} ifadesi kuramsal olarak türetilmekte, türetimler için BX-S sönümlenmesine ait olasılık yoğunluk fonksiyonundan (probability density function, PDF) yararlanılmaktadır. C_{eff} ifadesinin doğruluğu bilgisayar benzetimleri ile gösterilmeye çalışılmakta, farklı parametre değişimleri ile çeşitli senaryolar incelenmektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beşinci nesil (Fifth Generation, 5G) ve devamında gelecek olan yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinin düşük hata olasılık oranı, yüksek kapasite, yüksek kararlılık ve düşük gecikme gibi önemli sistem karakteristiklerine sahip olması hedeflenmektedir. Gelişen her yeni neslin bu karakteristik özellikleri karşılayabilir olması ve bir önceki nesle göre önemli iyileştirmeler sağlaması beklenmektedir. Bu kapsamda geliştirilecek olan her aday sistemin, öncelikle teorik analizlerinin gerçekleştirilmesi, başarımının farklı senaryolarda değerlendirilmesi ve ardından doğrulanan sistemin pratik uygulamasının gerçek hayata aktarılması sağlanmaktadır [1-3].

Herhangi bir haberleşme sistemine ait matematiksel ifade, çok yollu sönümlenme ve gölgeleme etkilerini de içeren kablosuz yayılım kanal modeline doğrudan ve tamamen bağlıdır. 5G ve ötesi gibi modern haberleşme sistemleri değerlendirildiğinde, iletişim ağına bağlanan gezgin kullanıcı ve cihazların artan miktarı kapsama alanının daralmasına, işaret gürültü oranının (signal-to-noise ratio, SNR) ve işaret gücünün girişim/gürültü gücüne oranının (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, mevcut klasik kablosuz kanal sönümlenme modelleri (örneğin Rayleigh, Rician, Nakagami- m , Hoyt, vb.) gerçek hayattaki kanal ölçümlerine tam olarak uymamaktadır. Bu probleme çözüm olarak Beaulieu-Xie (BX) kanal modeli literatüre kazandırılmıştır [4]. Bu kanal modelinin klasik sönümlü

kanal modellerine göre üstünlüğü, direkt görüş hattı (line of sight, LoS) ve direkt görüş hattı olmayan (non-line of sight, NLoS) durumları kapsayan geliştirilmiş bir kanal modeli olmasıdır. Ayrıca, bu kanal modelinin matematiksel ifadesinde uygun parametre seçimi yapılarak, Rayleigh, Ricean, geliştirilmiş Ricean, κ - μ ve Nakagami- m gibi klasik sönümlü kanal modellerine ait eşitlikler de elde edilebilmektedir. BX kanal modeli, geliştirilmiş bir kanal modeli olması nedeniyle son dönemde yoğun ilgi görmeye başlamıştır [5–15].

[6] numaralı çalışmada, kaskatlanmış çift BX sönümleme modeli için matematiksel bir karakterizasyon sunulmuş, olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) ve kümülatif dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF) ifadeleri türetilmiştir. Bir diğer çalışmada araştırmacılar, çöz-ve-aktar (decode-and-forward) tekniği kullanan radyo frekans (RF) ve serbest uzay optik (free-space optical, FSO) temelli çift atlamalı bir haberleşme sisteminin performansını BX kanalında analiz etmişlerdir [7]. BX sönümlü kanal modelinin, seviye geçiş oranı (level crossing rate, LCR) ortalama sönüm süresi (average fade duration, AFD) Olutayo ve arkadaşları tarafından analiz edilmiştir [8]. BX sönümleme kanalı için eşit kazanç birleştirme (equal gain combining, EGC), seçim birleştirme (selection combining, SC) ve maksimum oranlı birleştirme (maximal ratio combining, MRC) tekniklerinin farklı sınır analizleri Olutayo ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır [9]. Artan ilgi ile birlikte BX kanal modeline sönümlenme özelliğine ilave olarak gölgeleme etkisi de eklenerek Beaulieu-Xie gölgelemeli (BX-shadowed, BX-S) kanal modeli önerilmiştir [10]. [11]'de sunulan çalışmada gölgeleme etkisi olmadan Beaulieu-Xie sönümlü kanal için bir kapasite hesabı ortaya konulmuştur. Öte yandan Beaulieu-Xie rastgele değişkeninin sırasıyla η - μ , κ - μ , ve α - μ rastgele değişkenleri ile çarpımlarından oluşan yeni rastgele değişkenlerin servis-dışı kalma olasılığı analizi [12]'de sunulmuştur. [13]'teki yazarlar, iki Beaulieu-Xie değişkenli durumun ortak faz ve dağılımlarının analizini gerçekleştirmişlerdir. Akıllı yansıtıcı yüzeylerin BX-S kanalları için fiziksel katman güvenliğine olan etkisi [14]'teki çalışmada verilmiştir. Gerçekleştirilen literatür taramasında BX-S kanallar için efektif kanal kapasite (effective channel capacity, C_{eff}) analizinin, yazarların bildiği kadarıyla, şimdiye kadar gerçekleştirilmemiş olduğu görülmüştür. Bu motivasyon ışığında, bu çalışmada BX-S kanalları için C_{eff} analizi detaylı bir şekilde incelenmektedir. Böylelikle literatürdeki bu boşluk bu çalışma ile giderilmeye çalışılmaktadır. Bu kapsamda öncelikli olarak BX-S kanalları için C_{eff} eşitliği analitik yöntemler ile türetilmekte, ardından bilgisayar benzetimleri aracılığıyla kapsamlı analizler gerçekleştirilmektedir.

2. SİSTEM VE KANAL MODELLERİ (SYSTEM AND CHANNEL MODELS)

Tek girişli tek çıkışlı (single input single output, SISO), verici ile alıcı arasındaki sönümlenmenin Beaulieu-Xie gölgelemeli olduğu bir iletişim sistemi ele alınmaktadır. Bu çalışmada, ele alınan sisteme ait C_{eff} analizi gerçekleştirilmektedir. Kanal kapasitesinin analizi için alıcıdaki anlık SNR'sinin PDF ifadesinden faydalanılmaktadır. Buna göre ele alınan sistem için alıcıdaki anlık SNR'in PDF ifadesi [10]'daki çalışmadan yararlanarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \Xi \gamma^{m_x-1} {}_1F_1\left(m_y; m_x; \varpi \gamma\right) e^{-\frac{m_x}{\Omega_x} \gamma} \quad (1)$$

burada $\Xi = \frac{1}{\Gamma(m_x)} \left(\frac{m_y \Omega_x}{m_x \Omega_y + m_y \Omega_x} \right)^{m_y} \left(\frac{m_x}{\Omega_x} \right)^{m_x}$, m_x ve Ω_x sırasıyla sönümlenme parametresi ve NLoS

bileşenin gücüdür. m_y gölgeleme parametresini, Ω_y ise LoS bileşenin gücünü ifade etmektedir. $\Gamma(\cdot)$

Gama fonksiyonunu ve ${}_1F_1(\cdot; \cdot; \cdot)$ ise Hipergeometrik fonksiyonu temsil etmektedir [11]. Eşitlik (1)'deki ϖ

ise $\varpi = \frac{(m_x)^2 \Omega_y}{\Omega_x (m_x \Omega_y + m_y \Omega_x)}$ olarak tanımlanmaktadır.

[15]'deki ${}_1F_1(a; b; cx) = \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(a)_s c^s x^s}{(b)_s s!}$ seri açılımı kullanıldığında, Eşitlik (1)'deki PDF ifadesi,

$$f_{\gamma}(\gamma) = \Xi \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(m_y)_s \varpi^s}{(m_x)_s s!} \gamma^{m_x+s-1} e^{-\frac{m_x}{\Omega_x} \gamma} \quad (2)$$

olarak yeniden düzenlenmektedir. Analizlerde matematiksel olarak kullanım kolaylığı olduğu için Eşitlik (2)'deki PDF ifadesi kullanılmaktadır.

3. EFEKTİF KANAL KAPASİTESİ ANALİZİ (EFFECTIVE CHANNEL CAPACITY ANALYSIS)

Bir iletişim sisteminin C_{eff} ifadesi aşağıdaki şekilde tanımlanır [16]:

$$C_{eff} = -\frac{1}{A} \log_2 \left(E \left[(1+\gamma)^{-A} \right] \right) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (3)$$

burada, $E[\cdot]$ beklenen değer, $A = \delta \varphi B / \ln 2$, δ doluluk azalma oranını, φ blok uzunluğunu ve B ise bant genişliğini belirtmektedir. Eşitlik (1)'de verilen PDF ifadesi kullanılarak C_{eff} ifadesi,

$$C_{eff} = -\frac{1}{A} \log_2 \left(\Xi \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(m_y)_s \varpi^s}{(m_x)_s s!} \times I \right) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (4)$$

şeklinde elde edilir. Burada I ifadesi,

$$I = \int_0^{\infty} \gamma^{m_x+s-1} e^{-\frac{m_x}{\Omega_x} \gamma} (1+\gamma)^{-A} d\gamma \quad (5)$$

şeklinindedir. I integralini çözmek için,

$$(1+\gamma)^{-A} = \frac{1}{\Gamma(A)} G_{1,1}^{1,1} \left(\gamma \left| \begin{matrix} 1-A \\ 0 \end{matrix} \right. \right) \quad (6)$$

olarak verilen dönüşüm kullanılırsa,

$$I = \frac{1}{\Gamma(A)} \int_0^{\infty} \gamma^{m_x+s-1} e^{-\frac{m_x}{\Omega_x} \gamma} G_{1,1}^{1,1} \left(\gamma \left| \begin{matrix} 1-A \\ 0 \end{matrix} \right. \right) d\gamma \quad (7)$$

şeklinde bir integral elde edilir. Bu integralde integrant sabitine bağlı bir polinom, bir üstel ve bir Meijer's G fonksiyonu bulunmaktadır. Bu formata sahip olan I integralini çözmek için [15, Eşitlik (7.813.1)] kullanılarak

$$I = \frac{1}{\Gamma(A)} \left(\frac{m_x}{\Omega_x} \right)^{-(m_x+s)} G_{2,1}^{1,2} \left(\left(\frac{m_x}{\Omega_x} \right)^{-1} \left| \begin{matrix} 1-(m_x+s), 1-A \\ 0 \end{matrix} \right. \right) \quad (8)$$

şeklinde çözüm elde edilir. Eşitlik (8) ile elde edilen I çözümü, Eşitlik (4)'te yerine yazılarak

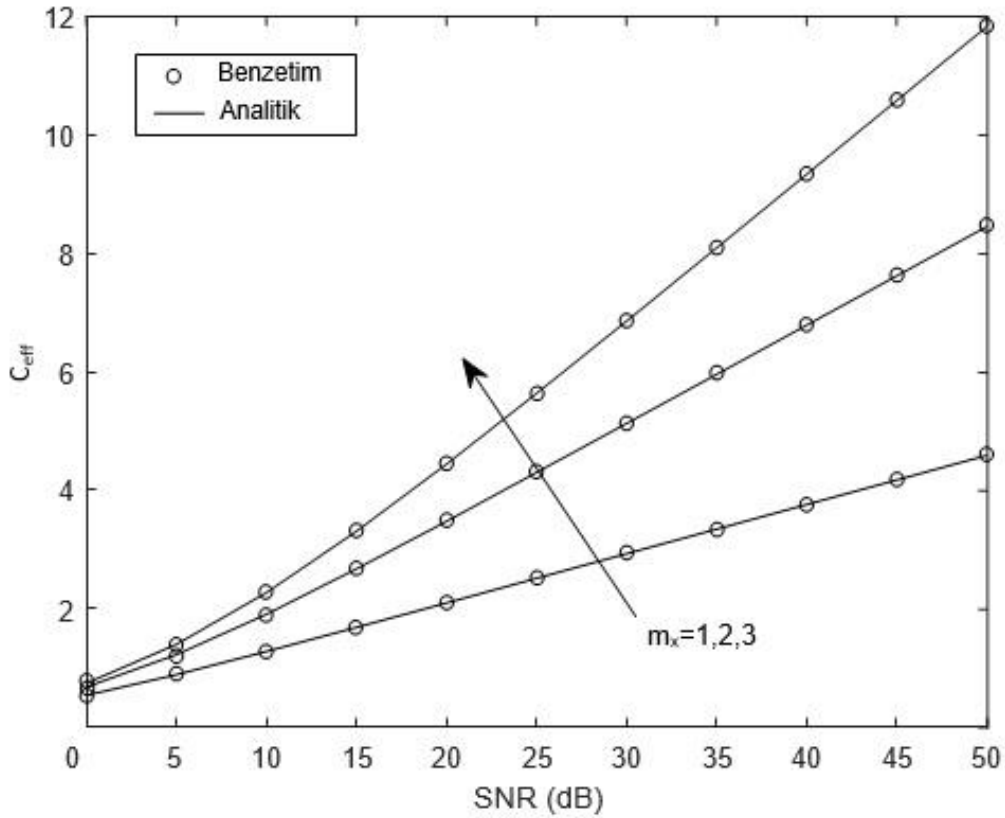
$$C_{eff} = -\frac{1}{A} \log_2 \left(\Xi \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(m_y)_s \varpi^s}{(m_x)_s s!} \frac{1}{\Gamma(A)} \left(\frac{m_x}{\Omega_x} \right)^{-(m_x+s)} G_{2,1}^{1,2} \left(\left(\frac{m_x}{\Omega_x} \right)^{-1} \left| \begin{matrix} 1-(m_x+s), 1-A \\ 0 \end{matrix} \right. \right) \right) \quad (9)$$

ifadesi türetilir. **Yazarların bildiği kadarıyla, Eşitlik (9)'da verilen ifade literatürde ilk kez bu çalışmada sunulmaktadır.**

4. BULGULAR (RESULTS)

Bu bölümde, ele alınan sistemin C_{eff} 'ine ait elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bir önceki bölümde türetilen Eşitlik (9)'daki ifade ile analitik sonuçlar elde edilirken, Eşitlik (4)'teki tam ifadenin nümerik olarak değerlendirilmesi ile bilgisayar benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bütün sonuçlarda, Eşitlik (9)'daki sonsuz terimli seri toplamında 20 terim kullanılmıştır. Bu çalışmadaki bütün sonuçlarda Mathematica ve Matlab yazılım programları kullanılmıştır. Bütün sonuç grafiklerinde analitik sonuçlar çizgilerle gösterilirken, tam benzetim sonuçları da simgelerle gösterilmektedir. Sonuçların hepsinde analitik sonuçlar ile tam benzetim sonuçlarının iyi bir uyum içerisinde olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum, yapılan kuramsal analiz doğru olduğunu açıkça göstermektedir.

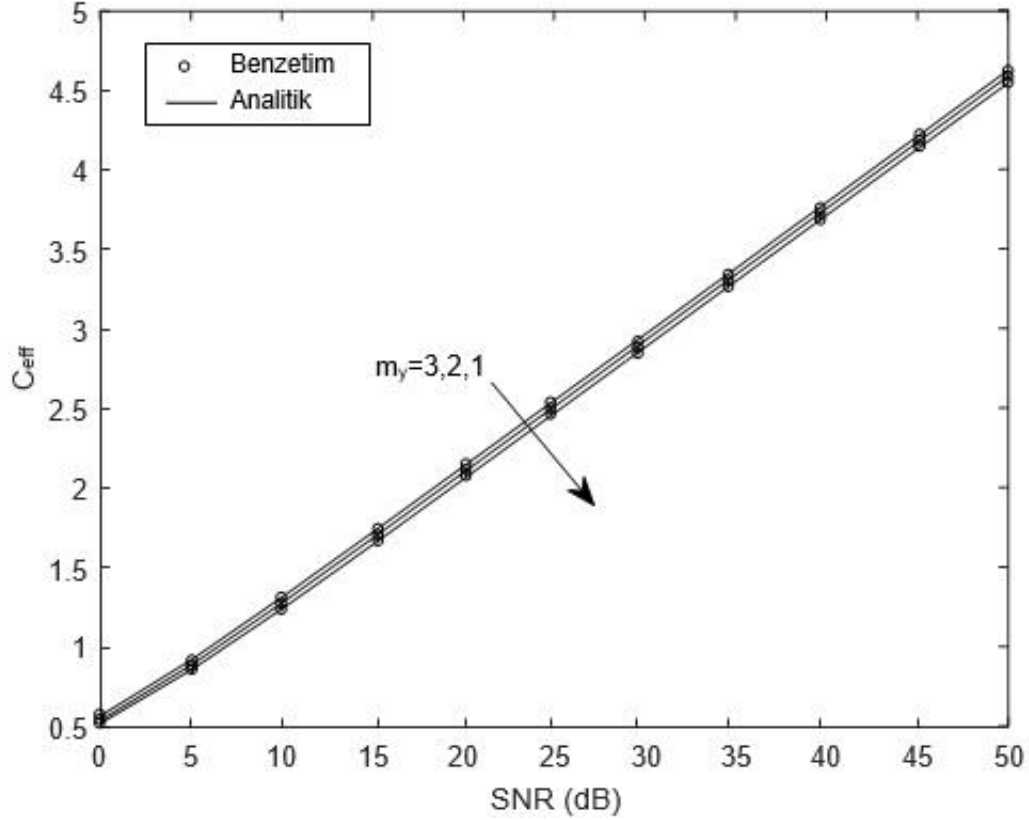
Şekil 1'de ele alınan sistem için m_x sönümlenme parametresinin değişiminin C_{eff} performansı üzerine olan etkileri gösterilmektedir. Şekil 1 için $m_y = 2$, $A = 4$ ve $\Omega_x = \Omega_y$ olup toplam ortalama SNR miktarının yarısına eşit olarak alınmıştır.



Şekil 1. m_x sönümlenme parametresi değişimine ele alınan sistemin C_{eff} performans eğrileri

Ayrıca, buradaki sonuçlarda m_x değeri sırasıyla 1, 2, ve 3 olarak alınmıştır. m_x parametre değerinin artmasıyla BX-S kanalların sönümlenme etkisinin iyileşmesi göz önüne alındığında, sistemin C_{eff} performansı iyileşmektedir. Bu durum literatürdeki çalışma örneklerinde de görülmektedir. Şekil 1'deki senaryoya benzer şekilde, BX-S kanalların m_y parametre değişiminin C_{eff} performansına olan etkisi Şekil 2'de incelenmektedir. Burada, $m_x = 1$, $A = 4$ ve $\Omega_x = \Omega_y$ olup toplam ortalama SNR miktarının yarısına eşittir. Şekil 2'den de görüldüğü gibi, m_y parametre değişiminin sistemin C_{eff} performansına olan etkisinin m_x parametre değişimine oranla daha az olduğu görülmektedir. Şekil 2'deki sonuçlarda, m_y parametre

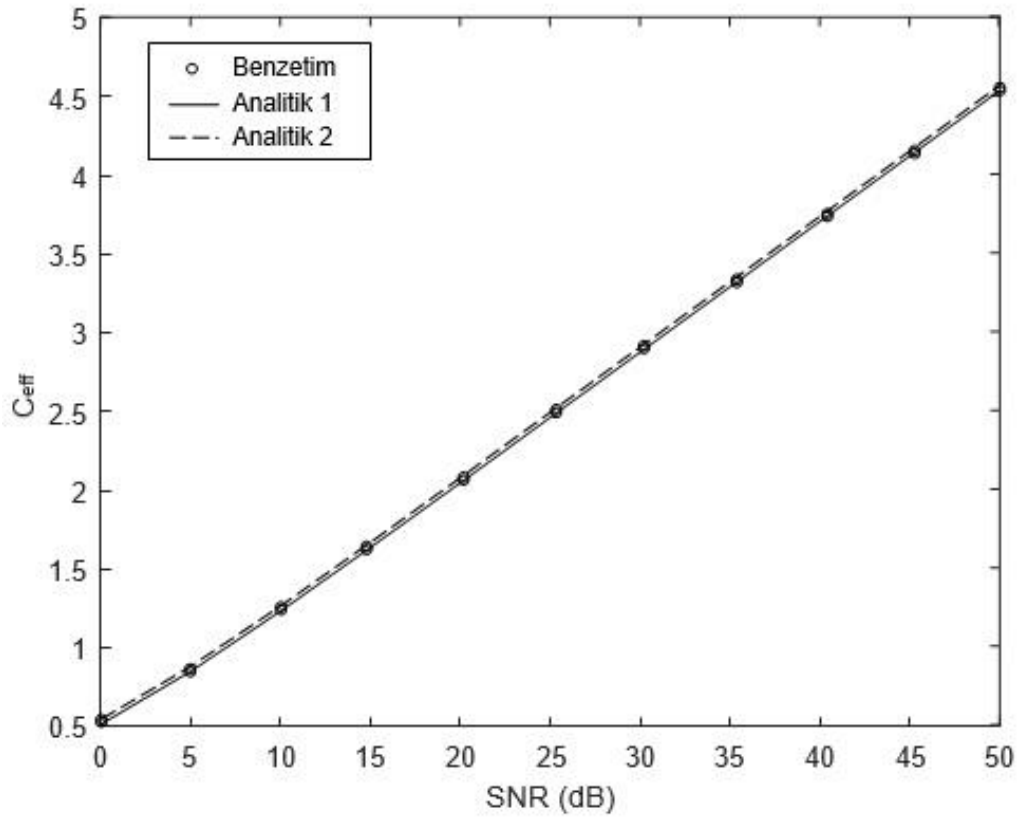
değeri 1, 2, ve 3 olarak ele alınmış, ancak her üç durumda da C_{eff} performanslarının birbirine oldukça yakın olduğu dikkati çekmektedir. Buradan hareketle, m_x parametresinin sistemin C_{eff} performansına olan etkisinin m_y parametresinin sistemin C_{eff} performansına olan etkisine göre daha fazla olduğu net bir şekilde ortadadır.



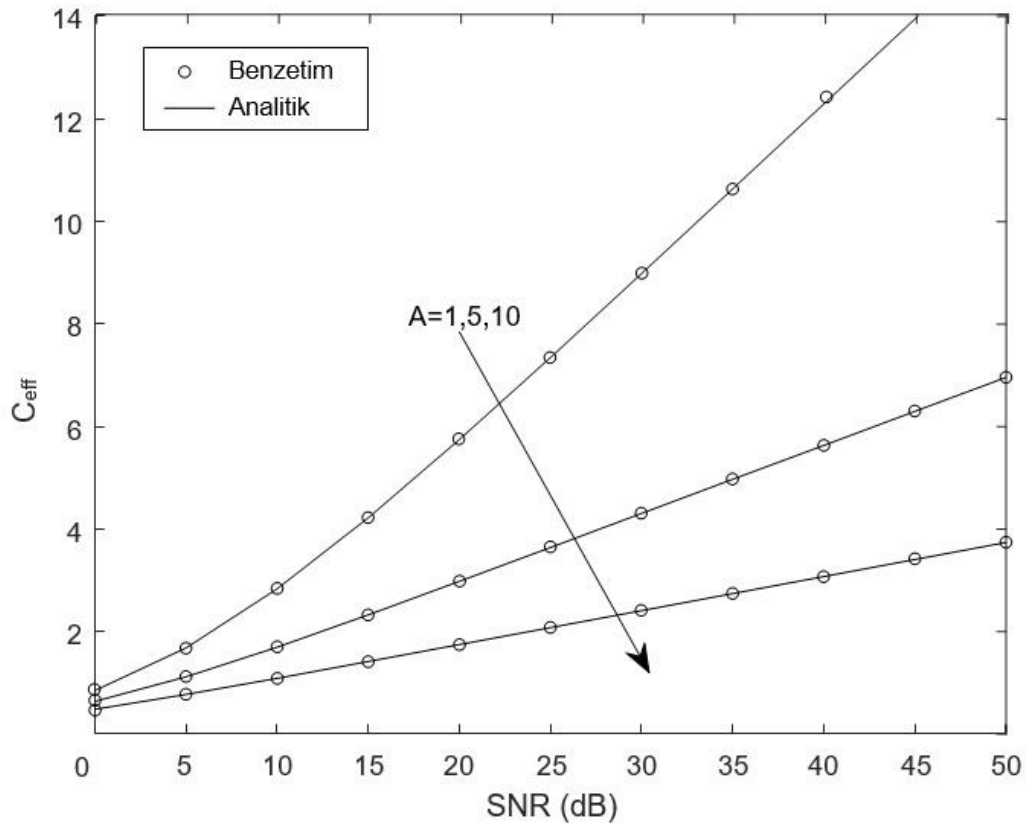
Şekil 2. Farklı m_y gölgeleme parametresi ile ele alınan sistemin C_{eff} kıyaslaması

Şekil 3'te sunulan sistemin C_{eff} performans kıyaslaması için $m_x = 1$, $m_y = 2$, ve $A = 4$ olup, farklı Ω_x ve Ω_y değerleri incelenmektedir. Birinci durumda (şekil üzerinde Analitik 1 olarak isimlendirilen durum) $\Omega_x = \Omega_y$ olup toplam ortalama SNR miktarının yarısına eşit (diğer sonuçlarda olduğu gibi) alınmış, ikinci durumda ise (şekil üzerinde Analitik 2 olarak isimlendirilen durum) Ω_x toplam ortalama SNR miktarının dörtte bir miktarına eşit iken, Ω_y toplam ortalama SNR miktarının dörtte birinin üç katına eşit olarak alınmıştır. Analitik 1 ve Analitik 2 olarak adlandırılmış bu iki durumda C_{eff} performansları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Bunun da sebebi BX-S kanalların Ω_x ve Ω_y ifadelerini ortak bir biçimde kullanan matematiksel bir modele sahip olması olarak yorumlanabilir.

Sunulan son sonuç grafiği Şekil 4'te, farklı A değerlerinin C_{eff} performans kıyaslamaları sunulmaktadır. Buradaki sonuçlar için $m_x = 2$, $m_y = 2$, ve $\Omega_x = \Omega_y$ olup toplam ortalama SNR miktarının yarısına eşittir. Şekil 4'ten de görüldüğü gibi, A değeri arttıkça, literatürdeki diğer çalışmalardaki gibi, sistemin C_{eff} performansı azalmaktadır.



Şekil 3. Farklı Ω_x ve Ω_y değerleri ile ele alınan sistemin C_{eff} performans kıyaslaması



Şekil 3. Farklı A değerleri durumları ile ele alınan sistemin C_{eff} performans kıyaslaması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

BX-S sönümlü kanallardaki SISO bir sistemin C_{eff} ifadesi kuramsal olarak literatürde ilk kez bu çalışmada türetilmiş ve ele alınan sistemin C_{eff} performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sunulan C_{eff} ifadesinin doğruluğu tam nümerik benzetim çalışmaları ile gösterilmeye çalışılmıştır. BX-S kanal modeline ait parametrelerin değişimleri ile farklı senaryolar oluşturulmuş, buna göre C_{eff} performansının değişimleri sunulmuştur. İki kollu iletim, röleli aktif iletim veya çok girişli çok çıkışlı sistem modelleri gibi farklı sistem yapılarının BX-S kanallarındaki kapasite analizlerinin yapılması bu çalışmanın devamı olabilecek çalışmalar olarak belirtilebilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Y. Kabalci, 5G mobile communication systems: Fundamentals, challenges, and key technologies, in *Smart Grids and Their Communication Systems*, Springer, (2019), 329–359.
- [2] S. Ramavath, A. V. Jha, U. Chandra, B. Appasani, Y. Kabalci, and E. Kabalci, PAPR reduction of filter bank techniques for 5G communication systems,” in *5G and Beyond Wireless Systems*, Springer, (2021), 171–189.
- [3] Y. Kabalci, 5G iletişim sistemleri için aday iletim tekniklerinin bit hata oranı başarımlarının araştırılması, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendis. Bilim. Derg.*, 9: 2, (2020), 821–831.
- [4] N. C. Beaulieu and X. Jiandong, A novel fading model for channels with multiple dominant specular components,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, 4: 1, (2014), 54–57.
- [5] M. Bilim, A comprehensive analytical perspective of ASEP for Beaulieu-Xie fading channels, *Int. J. Commun. Syst.*, p. e5244, doi: <https://doi.org/10.1002/dac.5244>.
- [6] H. S. Silva, D. B. Almeida, W. J. Queiroz, I. E. Fonseca, A. S. Oliveira, and F. Madeiro, Cascaded double Beaulieu-Xie fading channels, *IEEE Commun. Lett.*, 24: 10, (2020), 2133–2136.
- [7] J. Hu, Z. Zhang, J. Dang, L. Wu, and G. Zhu, Performance of decode-and-forward Relaying in mixed Beaulieu-Xie and M dual-hop transmission systems with digital coherent detection, *IEEE Access*, 7, (2019), 138757–138770.
- [8] A. Olutayo, H. Ma, J. Cheng, and J. F. Holzman, Level crossing rate and average fade duration for the Beaulieu-Xie fading model, *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, 6: 3, (2017), 326–329.
- [9] A. Olutayo, J. Cheng, and J. F. Holzman, Performance bounds for diversity receptions over a new fading model with arbitrary branch correlation, *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, 2020: 1, (2020), 1–26.
- [10] A. Olutayo, J. Cheng, and J. F. Holzman, A new statistical channel model for emerging wireless communication systems, *IEEE Open J. Commun. Soc.*, 1, (2020), 916–926.
- [11] V. Kansal and S. Singh, Analysis of effective capacity over Beaulieu-Xie fading model, IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), 2017, pp. 207-210, doi: 10.1109/WIECON-ECE.2017.8468917.
- [12] H. S. Silva, D. B. T. Almeida, W. J. L. Queiroz, I. E. Fonseca, A. S. R. Oliveira and F. Madeiro, Outage Probability of the Product of Two Beaulieu-Xie, η - μ , κ - μ , or α - μ Random Variables, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19: 12, (2020), 2182-2186.

- [13] H. S. Silva, D. B. T. Almeida, W. J. L. Queiroz, H. T. P. Silva, A. S. R. Oliveira and F. Madeiro, Beaulieu-Xie Phase-Envelope Joint and Bivariate Distributions, *IEEE Commun. Lett.*, 25: 5, (2021), 1453-1457.
- [14] A. S. Gvozdarev, T. K. Artemova, D. M. Murin and P. E. Patralov, Reconfigurable Intelligent Surfaces' Impact on the Physical Layer Security of the Beaulieu-Xie Shadowed Fading Channel, International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISNCC55209.2022.9851721.
- [15] I. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series, and products*. Academic press, 2000.
- [16] M. Bilim, Effective throughput of alternate rician shadowed fading links, *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, 15: 6, (2020) 928–930.