

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

AKILLI YANSITICI YÜZEY DESTEKLİ MIMO SİSTEMLERİNDE KANAL KAPASİTESİ ANALİZİ

CHANNEL CAPACITY ANALYSIS OF INTELLIGENT
REFLECTING SURFACE ASSISTED MIMO SYSTEMS

Yazarlar (Authors): Havva Esra Bakbak^{ID*}, Osman Demirci^{ID}, Bilal Karaman^{ID}, İlhan Baştürk^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bakbak H. E., Demirci O., Karaman B., Baştürk İ., "Akıllı Yansıtıcı Yüzey Destekli MIMO Sistemlerinde Kanal Kapasitesi Analizi" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 10(1): 225-233, (2026).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1910532

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

AKILLI YANSITICI YÜZEY DESTEKLİ MIMO SİSTEMLERİNDE KANAL KAPASİTESİ ANALİZİ

Havva Esra Bakbak^a, Osman Demirci^b, Bilal Karaman^c, İlhan Baştürk^c

^aEge Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

^bManisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, TÜRKİYE

^cManisa Celal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: bilisik.h@gmail.com

(Geliş/Received: 15.03.26; Düzeltme/Revised: 10.04.26; Kabul/Accepted: 15.04.26)

ÖZET

Bu çalışmada Akıllı Yansıtıcı Yüzey (Ayy) destekli Çok Girdili Çok Çıktılı (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) sistemlerinde kanal kapasitesini etkileyen temel parametreler incelenmiştir. Artan veri hızı gereksinimleri doğrultusunda milimetre dalga (mmWave) frekans bantlarının kablosuz haberleşme sistemlerindeki rolü ele alınmış ve bu frekans bantlarında ortaya çıkan yayılım kayıpları ile atmosferik etkiler değerlendirilmiştir. Özellikle yağış gibi çevresel faktörlerin mmWave haberleşme üzerindeki etkileri incelenmiş ve yağmur zayıflamasının sistem performansı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca, doğrudan görüş hattının zayıf olduğu senaryolarda kanal koşullarını iyileştirmek amacıyla Ayy destekli haberleşme sistemi ele alınmıştır. Gerçekleştirilen sayısal simülasyonlar ile Ayy eleman sayısı, iletim yapan anten sayısı, Ayy konumu ve yağış şiddeti gibi parametrelerin erişilebilir kapasite üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Ayy destekli sistemlerin özellikle mmWave haberleşme ortamında kanal kapasitesini artırarak sistem performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

Keywords: MIMO, Akıllı Yansıtıcı Yüzeyler, 6G, Milimetre Dalgaları.

CHANNEL CAPACITY ANALYSIS OF INTELLIGENT REFLECTING SURFACE ASSISTED MIMO SYSTEMS

ABSTRACT

In this study, the fundamental parameters affecting channel capacity in Intelligent Reflecting Surface (IRS)-assisted Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) systems are investigated. In line with the increasing data rate requirements, the role of millimeter-wave (mmWave) frequency bands in wireless communication systems is examined, and the propagation losses and atmospheric effects occurring in these frequency bands are evaluated. In particular, the impact of environmental factors such as rainfall on mmWave communication is analyzed, and the effect of rain attenuation on system performance is investigated. In addition, an-assisted communication system is considered in scenarios where the direct line-of-sight between the transmitter and receiver is weak. Through numerical simulations, the effects of parameters such as the number of IRS elements, the number of transmit antennas, IRS location, and rainfall intensity on the achievable capacity are evaluated. The obtained results show that IRS-assisted systems can significantly improve system performance by increasing the channel capacity, particularly in mmWave communication environments.

Keywords: MIMO, Intelligent Reflecting Surfaces, 6G, Millimeter Wave.

1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşme sistemleri, bilginin antenler aracılığıyla fiziksel bir bağlantıya ihtiyaç duyulmadan iletilmesini sağlayan modern iletişim altyapılarının temelini oluşturmaktadır. Bu sistemlerde veri iletimi için kullanılan başlıca kaynaklar zaman, frekans ve kod olarak sınıflandırılmaktadır. Söz konusu kaynakların etkin ve verimli kullanımı, kullanıcılara yüksek veri hızları, düşük gecikme süreleri ve geniş kapsama alanı sunulabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, son yıllarda mobil cihaz kullanımındaki hızlı artış ve yüksek veri gerektiren uygulamaların yaygınlaşması, mevcut kablosuz haberleşme sistemlerinin kapasite ve performans sınırlarını zorlamaktadır [1]. Bu durum, sınırlı spektrum kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlayacak yeni teknolojilerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Haberleşme sistemlerinde kapasitenin artırılmasına yönelik en önemli yaklaşımlardan biri çok antenli sistemlerin kullanılmasıdır. Tek antenli haberleşme sistemleri (İng: Single-Input Single-Output, SISO) kablosuz iletişim sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Bununla birlikte, spektral verimlilik ve güvenilirliği artırma gereksinimi doğrultusunda literatürde çoklu anten teknikleri üzerine yoğun çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, çoklu anten mimarileri Çok Girdili Tek Çıktılı (İng: Multiple-Input Single-Output, MISO), Tek Girdili Çok Çıktılı (İng: Single-Input Multiple-Output, SIMO) ve Çok Girdili Çok Çıktılı (İng: Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) sistemleri gibi farklı yapılandırmalar altında incelenmektedir. Bu sistemler haberleşme senaryosuna ve sistem gereksinimlerine bağlı olarak farklı avantajlar sunan çoklu anten teknikleri olarak değerlendirilmektedir. [2–4]. MIMO sistemlerde hem verici hem de alıcı tarafında birden fazla anten kullanılarak uzamsal çeşitlilik ve uzamsal çoğullama kazançları elde edilebilmektedir.

Ancak özellikle doğrudan görüş hattının (İng: Line of Sight, LoS) bulunmadığı senaryolarda bu yöntemler her zaman yeterli olmamaktadır. Bu nedenle son yıllarda Akıllı Yansıtıcı Yüzey (AYY) teknolojisi kablosuz haberleşme sistemlerinde önemli bir çözüm olarak öne çıkmıştır [5]. AYY yapıları, üzerinde çok sayıda pasif yansıtıcı eleman bulunan ve gelen

elektromanyetik dalgaların fazını kontrol ederek sinyalin istenilen yöne yönlendirilmesini sağlayan programlanabilir yüzeylerdir [6]. Bu sayede kanal koşulları iyileştirilebilmekte, kapsama alanı artırılabilen ve sistem performansı önemli ölçüde geliştirilebilmektedir [7].

Kablosuz haberleşme sistemlerinde kapasite, kapsama ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla yoğun (İng: massive) MIMO ve AYY önemli araştırma alanları haline gelmiştir [8]. AYY teknolojisi, kablosuz ortamın pasif olarak kontrol edilmesini sağlayarak geleneksel sistemlere kıyasla önemli performans kazanımları sunmaktadır.

AYY destekli yoğun MIMO sistemlerinde yapılan çalışmalarda, istatistiksel kanal bilgisine dayalı tasarım yaklaşımlarının sistem karmaşıklığını azaltırken performansı artırdığı gösterilmiştir. Özellikle AYY faz konfigürasyonlarının istatistiksel kanal bilgisi (İng: Channel State Information, CSI) kullanılarak optimize edilmesiyle sistem veri hızında önemli artışlar elde edilmiştir [9]. Ayrıca doğrudan bağlantıların varlığında dahi AYY'nin performans kazancı sağlamaya devam ettiği ortaya konmuştur [9]. Bu bağlamda, AYY'nin yalnızca kanal kazancını artırmakla kalmayıp aynı zamanda kullanıcılar arası girişimi yönetmede de etkin bir araç olduğu gösterilmektedir [10].

AYY destekli MIMO sistemlerinde önemli bir diğer konu ise kanal kestirimidir. AYY'nin pasif yapısı nedeniyle kanal kestirimi daha karmaşık hale gelmektedir. Bu doğrultuda, AYY faz matrisinin değiştirilmesiyle çoklu ölçümler elde edilerek kanal kestirimi yapılmasını sağlayan iteratif algoritmalar önerilmiştir [11]. Bununla birlikte, kullanıcı sayısının arttığı yoğun senaryolarda pilot sinyallerinin yeniden kullanımı sonucu ortaya çıkan pilot kirliliği, sistem performansını sınırlayan temel problemlerdendir. Son çalışmalarda, AYY kullanılarak aynı hücre içerisinde pilot yeniden kullanımının mümkün hale getirilebildiğini ve bu sayede spektral verimliliğin artırıldığını göstermektedir [10].

Yoğun MIMO sistemlerinde donanım karmaşıklığını azaltmaya yönelik çalışmalarda ise AYY ile anten seçimi birlikte ele alınmıştır. Bu yaklaşımda, daha az RF zinciri kullanılarak

sistem kapasitesi korunmakta veya artırılmaktadır. Anten seçimi ve pasif hüzmleme (İng: Beamforming) işlemlerinin birlikte optimize edilmesiyle spektral verimlilikte önemli iyileşmeler sağlanmıştır [12]. Ancak, pratik sistemlerde donanım kusurları kaçınılmaz olup, bu kusurlar sistem performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. AYY destekli sistemler üzerinde yapılan çalışmalar, AYY kullanımının spektral verimliliği artırabildiğini ancak bu kazanımın donanım kalitesi ve sistem parametrelerine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır [13].

AYY teknolojisinin yalnızca kapasite artışı değil, aynı zamanda geniş ölçekli nesnelerin interneti (İng: Internet of Things, IoT) sistemlerinde bağlantı yoğunluğunu artırma potansiyeline sahip olduğu da gösterilmiştir. AYY destekli yoğun IoT sistemlerinde kanal kestirimi ve aktif cihaz tespiti birlikte ele alınarak sistem performansının iyileştirildiği görülmektedir [14].

1.1. MIMO Sinyal Modeli

M_R alıcı ve M_T verici antene sahip bir MIMO sisteminde alınan sinyal vektörü $y \in \mathbb{C}^{M_R \times 1}$ Denklem (1)'de gösterilmiştir.

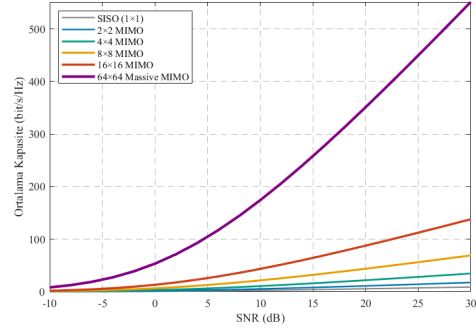
$$y = Hx + n \quad (1)$$

Denklem (1)'de $H \in \mathbb{C}^{M_R \times M_T}$ kanal matrisini, $x \in \mathbb{C}^{M_T \times 1}$ iletilen sinyal vektörünü ve $n \in \mathbb{C}^{M_R \times 1}$ sıfır ortalamalı, birim varyanslı Gauss gürültüsünü temsil etmektedir. Bu çalışmada, kanal matrisinin her girişi bağımsız ve özdeş dağılımlı $\mathcal{CN}(0,1)$ kompleks Gauss rastlantı değişkeni olduğu varsayımı altında sistem Rayleigh sönmüleme kanal modeli ile ifade edilmektedir.

Verici tarafında toplam iletim gücünün P ile sınırlandırıldığı ve bu gücün M_T verici anteni arasında eşit olarak paylaştırıldığı varsayılmaktadır. Bu durumda her bir antenden iletilen güç $\frac{P}{M_T}$ olmaktadır. Gürültü varyansı σ_n^2 olmak üzere sistemin kanal kapasitesi, Shannon kapasite bağıntısına göre Denklem (2)'de verilmektedir:

$$C = \log_2 \det \left(I_{M_R} + \frac{P}{M_T \sigma_n^2} H H^H \right) \text{ [bit/s/Hz]} \quad (2)$$

Denklem (2)'de I_{M_R} , M_R boyutlu birim matrisi; H^H ise H matrisinin Hermitian transpozunu göstermektedir. Bu doğrultuda, Şekil 1'de anten sayılarına bağlı olarak kapasitenin değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, SISO sistemlerden MIMO sistemlere doğru geçildikçe kapasitenin arttığı böylece birim frekansta saniyede gönderilen bit sayısının arttığı görülmektedir.



Şekil 1. SISO ve MIMO kapasite karşılaştırması

Kablosuz haberleşme sistemlerinde anten sayısının daha da artırılması ile ortaya çıkan yoğun MIMO mimarisi, son yıllarda büyük ilgi gören önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Yoğun MIMO kavramı ilk olarak Marzetta tarafından ortaya konulmuş olup bu yaklaşımda baz istasyonlarında onlarca hatta yüzlerce anten kullanılarak aynı zaman ve frekans kaynakları üzerinden çok sayıda kullanıcıya eş zamanlı hizmet verilebileceği gösterilmiştir [15]. Anten sayısının kullanıcı sayısından fazla olması sayesinde sistemdeki uzamsal serbestlik derecesi artırılmakta ve kullanıcılar arası girişim önemli ölçüde azaltılabilmektedir [16,17]. Bu sayede yüksek spektral verimlilik, gelişmiş enerji verimliliği ve güçlü hüzmleme yetenekleri elde edilmektedir. Yoğun MIMO teknolojisi, özellikle 5G ve ötesi haberleşme sistemlerinde yüksek veri hızlarının sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

1.2. Milimetre Dalga Haberleşmesi

Artan veri talebini karşılamak amacıyla kablosuz haberleşme sistemlerinde yalnızca anten sayısının artırılması yeterli olmamakta, aynı zamanda daha geniş bant genişliği sunan yüksek frekans bantlarının kullanılması da gerekmektedir. Bu bağlamda milimetre dalga (İng: millimeter wave, mmWave) frekans bantları önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Yaklaşık 28–100 GHz frekans aralığını kapsayan mmWave bantları, geniş

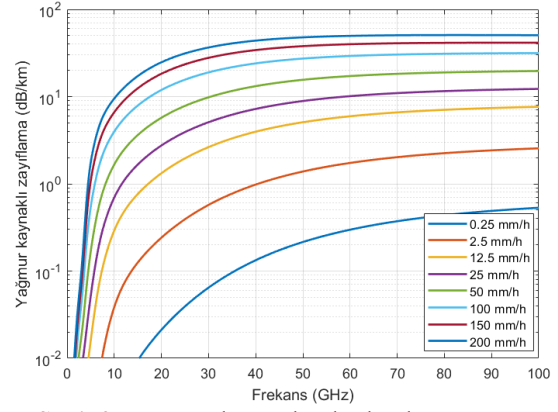
bant genişliği sunarak çok yüksek veri hızlarının elde edilmesine olanak tanımaktadır [18]. Ayrıca kısa dalga boyları sayesinde yoğun MIMO sistemlerinde çok sayıda antenin kompakt yapılar içerisinde yerleştirilmesi mümkün olmaktadır.

Bununla birlikte, mmWave frekans bantlarının en önemli dezavantajlarından biri yüksek yayılım kayıpları ve çevresel koşullara karşı duyarlılığıdır. mmWave sinyalleri binalar, ağaçlar, insan vücudu ve atmosferik koşullar gibi engellerden ciddi şekilde etkilenmektedir. Özellikle yağış gibi atmosferik olaylar, mmWave haberleşme sistemlerinde önemli seviyede sinyal zayıflamasına neden olmaktadır. Yağmur kaynaklı özgül zayıflama frekans ve yağış şiddetine bağlı olarak Denklem (3)'teki gibi ifade edilebilir.

$$\gamma_R(f) = k(f) R^{\alpha(f)} \quad (3)$$

Burada $\gamma_R(f)$, yağmur kaynaklı özgül zayıflamayı ifade etmekte olup birimi dB/km'dir. Bu parametre, elektromanyetik dalganın yağış ortamında birim mesafe başına ne kadar zayıfladığını göstermektedir. f taşıyıcı frekansını (GHz) ve R yağış şiddetini (mm/saat) temsil etmektedir. k ve α ise frekansa bağlı olarak değişen ampirik katsayılar olup, ITU-R P.838 standardına göre belirlenmektedir [19]. Bu parametreler incelendiğinde, frekans ve yağış şiddeti arttıkça özgül zayıflamanın önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu durum, özellikle yüksek frekanslı mmWave sistemlerinde sinyalin iletim mesafesini sınırlandıran kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 2'de, yağış şiddetine bağlı olarak mmWave sinyallerinde meydana gelen zayıflama etkisi gösterilmektedir. Şekil 2 incelendiğinde, özellikle yüksek frekanslarda ve yoğun yağış koşullarında sinyal zayıflamasının ciddi seviyelere ulaştığı görülmektedir.



Şekil 2. Yağmur hızına bağlı olarak mmWave zayıflama etkisi.

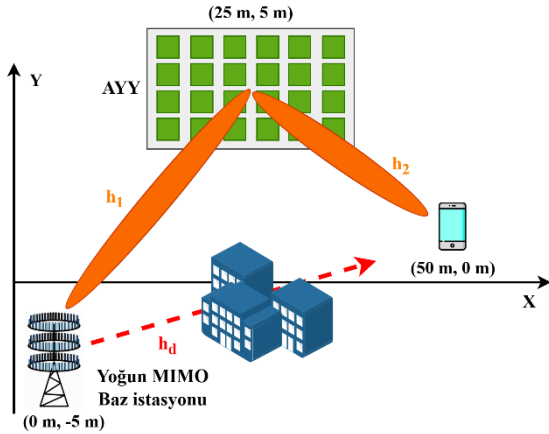
mmWave haberleşme sistemlerinde ortaya çıkan bu yayılım problemlerini azaltmak amacıyla küçük hücre yapıları, yoğun baz istasyonu yerleşimleri ve gelişmiş hüzmleme teknikleri kullanılmaktadır. Özellikle LoS hattının bulunmadığı senaryolarda ise AYY teknolojisinin kullanılmasıyla birlikte mmWave sistemlerinde performansın kayda değer oranda artırılması mümkün hale gelmektedir.

1.3. Çalışmanın Katkıları

Gelişen kablosuz haberleşme teknolojilerinde, özellikle mmWave bantlarında karşılaşılan yüksek yol kaybı ve bloklama etkilerinin giderilmesinde çoklu anten teknikleri ile AYY tabanlı çözümler kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, bu çalışmada yoğun MIMO sistemlerinde AYY kullanımının sistem performansına etkisi kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, yoğun MIMO sistemlerinde mmWave haberleşme ortamında AYY kullanımının sistem performansına etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar aracılığıyla AYY eleman sayısının, verici anten sayılarının, AYY konumunun ve yağmur kaynaklı zayıflamanın sistem kapasitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, uygun konfigürasyonlarda AYY destekli sistemlerin yüksek anten sayısına sahip geleneksel sistemlerle karşılaştırılabilir performans sağlayabildiğini göstermekte olup bu durum AYY teknolojisinin gelecekteki kablosuz haberleşme sistemleri için önemli bir tamamlayıcı çözüm olabileceğini ortaya koymaktadır.

2. SİSTEM MODELİ

Bu bölümde, M_T antenli bir baz istasyonunun (İng: Base Station, BS) N yansıtıcı elemana sahip bir AYY aracılığıyla tek antenli kullanıcıya (İng: User Equipment, UE) hizmet verdiği aşağı yönlü haberleşme senaryosu ele alınmıştır. Ortamdaki engellerden dolayı BS ile UE arasındaki doğrudan iletim kanalının yüksek yol kaybına maruz kaldığı varsayılmaktadır. Dolayısıyla veri iletimi hem doğrudan kanal hem de AYY vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Sistem modeline ait görsel Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. AYY destekli yoğun MIMO haberleşme sistemi.

AYY destekli yoğun MIMO sisteminde UE'de alınan sinyal ifadesi Denklem (4)'te verilmiştir.

$$y = \sqrt{\rho} \cdot (\mathbf{h}_d^H \mathbf{w}_{bs} + \mathbf{h}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{h}_1 \mathbf{w}_{bs}) \cdot s + n \quad (4)$$

Burada, ρ verici gücü ile gürültü gücü oranı olarak tanımlanan ortalama SNR ifadesini, $\mathbf{h}_d \in \mathbb{C}^{(M_T \times 1)}$ BS ile UE arasındaki doğrudan kanal vektörünü, $\mathbf{h}_1 \in \mathbb{C}^{(N \times M_T)}$ BS ile AYY arasındaki kanal matrisini, $\mathbf{h}_2 \in \mathbb{C}^{(N \times 1)}$ AYY ile UE arasındaki kanal vektörünü, $\mathbf{w}_{bs} \in \mathbb{C}^{(M_T \times 1)}$ BS'deki ön kodlama vektörünü, $\boldsymbol{\Theta} = \text{diag}(e^{j\varphi^1}, \dots, e^{j\varphi^N}) \in \mathbb{C}^{(N \times N)}$ AYY faz kaydırma matrisini, s gönderilen sembolü ve $n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ ise UE'deki eklenebilir beyaz Gauss gürültüsünü (İng: Additive White Gaussian Noise, AWGN) temsil etmektedir.

BS tarafında, kanal enerjisini kullanıcıya odaklamak amacıyla Maksimum Oran İletimi (İng: Maximum Rate Transmission, MRT) ön kodlaması uygulanmaktadır. MRT ön kodlama vektörü, doğrudan kanal vektörünün normalize

edilmiş biçimi olarak Denklem (5)'de verilmiştir.

$$\mathbf{w}_{bs} = \frac{\mathbf{h}_d}{\|\mathbf{h}_d\|} \quad (5)$$

AYY'deki her yansıtıcı eleman, gelen sinyale birim genlikte faz kaydırması uygulamaktadır. Mükemmel faz hizalama koşulunda, tüm N elemanın alıcıda yapıcı olarak toplanabilmesi için her elemana ait optimal faz değeri Denklem (6)'daki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\varphi_n = -\angle(\mathbf{h}_{2n}) - \angle(\mathbf{v}_n), n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

Burada, $\mathbf{v}_n = [\mathbf{h}_1 \mathbf{w}_{bs}]_n$, BS'den uygulanan ön kodlama sonrası AYY'nin n . elemanına ulaşan eşdeğer kompleks kanal bileşenini ifade etmektedir. Denklem (6)'daki faz seçimi ile AYY yansıma kazancı maksimum değerine ulaşmakta ve Denklem (7)'deki gibi ifade elde edilmektedir.

$$G_{AYY} = |\mathbf{h}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{v}| = \sum_n |\mathbf{h}_{2n}| \cdot |\mathbf{v}_n| \quad (7)$$

Denklem (4)'ten faydalanarak UE'deki alınan SNR ifadesi Denklem (8)'deki şekilde yazılabilir.

$$\gamma_{AYY} = \frac{\rho |\mathbf{h}_d^H \mathbf{w}_{bs} + \mathbf{h}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{h}_1 \mathbf{w}_{bs}|^2}{\sigma_n^2} \quad (8)$$

AYY kullanılmayan doğrudan iletim durumunda ise UE'deki SNR ifadesi Denklem (9)'da verilmiştir.

$$\gamma_{direkt} = \frac{\rho |\mathbf{h}_d^H \mathbf{w}_{bs}|^2}{\sigma_n^2} \quad (9)$$

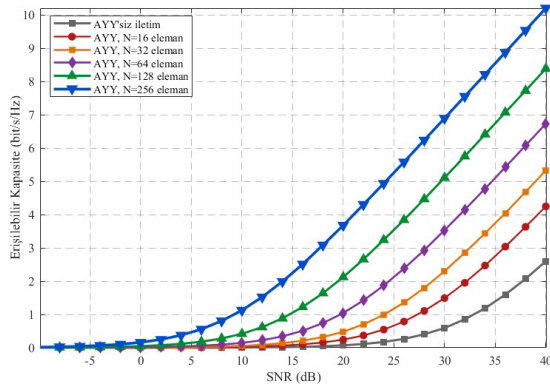
Her iki senaryo için elde edilebilir kapasite Shannon limiti çerçevesinde Denklem (10)'daki şekilde ifade edilmektedir.

$$C = \log_2(1 + \gamma) \quad [\text{bit/s/Hz}] \quad (10)$$

3. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, AYY destekli ve AYY desteksiz Yoğun MIMO haberleşme sistemlerinin elde edilebilir kapasite performanslarını karşılaştırabilmek amacıyla gerçekleştirilen kapsamlı bilgisayar benzetimlerinin sonuçları sunulmuştur. Kullanılan benzetim senaryosunda BS ile UE arasındaki doğrudan kanal, BS ile AYY arasındaki kanal ve AYY ile UE arasındaki kanalların bağımsız ve Rayleigh

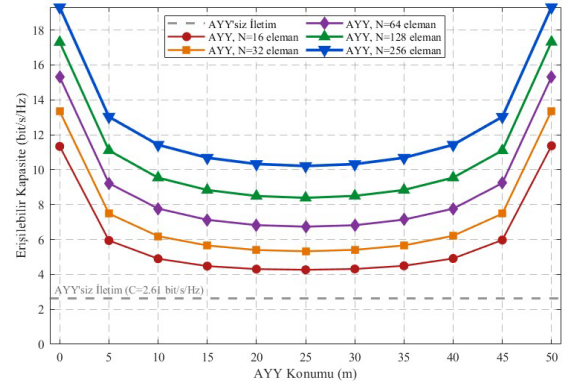
sönümlenmeli olduğu varsayılmaktadır. İlgili tüm kanallar $CN(0,1)$ dağılımına göre oluşturulmuş olup büyük ölçekli yol kaybı etkisi küçük ölçekli sönümlenme modelinden ayrıştırılarak uygulanmıştır. 10^5 iterasyon ile gerçekleştirilen Monte Carlo benzetimlerinde BS ile UE arasındaki doğrudan kanalın yol kaybı $PL_{\text{direkt}} = \sqrt{d^{-\tau_1}}$, BS ile AYY ve AYY ile UE arasındaki alt kanalların yol kaybı ise $PL_{\text{BS-AYY}} = \sqrt{d^{-\tau_2}}$ ve $PL_{\text{AYY-UE}} = \sqrt{d^{-\tau_2}}$ şeklinde hesaplanmıştır. Burada d ilgili cihazlar arasındaki mesafeyi temsil ederken, yol kaybı katsayıları doğrudan yol için $\tau_1 = 3,0$ ve AYY alt kanalları için $\tau_2 = 2,0$ olarak seçilmiştir. Şekil 1'deki sistem modeli doğrultusunda BS pozisyonu $(0\text{ m}, -5\text{ m})$, AYY pozisyonu $(25\text{ m}, 5\text{ m})$, UE pozisyonu ise $(50\text{ m}, 0\text{ m})$ olarak belirlenmiştir. Sistemde kullanılan çalışma frekansı ise 28 GHz seçilmiştir. Şekil 4'te AYY destekli haberleşme senaryosuna dair toplam erişilebilir veri hızı performansı sunulmuştur.



Şekil 4. AYY destekli yoğun MIMO sisteminde veri hızı performansı ($M_T = 64$).

Şekil 4 incelendiğinde, AYY'siz iletimde sistemdeki performansın oldukça verimsiz olduğu gözlenmektedir. Buna karşılık, AYY destekli iletimde, yansıtıcı eleman sayısı arttıkça toplam erişilebilir veri hızı artış göstermektedir. Örneğin, 30 dB'lik SNR olduğu durumda AYY'deki eleman sayısının iki kat artırılması, toplam erişilebilir veri hızınının 1 bit/s/Hz iyileşmesini sağlamaktadır. Bu sonuçlar yoğun MIMO sistemlerinde mmWave'lerin kötü kanal koşullarından oldukça olumsuz etkilendiğini ortaya koymaktadır. AYY gibi iletişime yardımcı teknolojiler sayesinde doğrudan görüş hattı bulunan güçlü kanallar oluşturulduğunda ise sistem performansı yükselmektedir. Ancak, AYY element sayısındaki artışın faz öteleme

matrislerinin hesaplanması süreçlerinde işlem yükünü artıracak göz önünde bulundurulmalıdır.

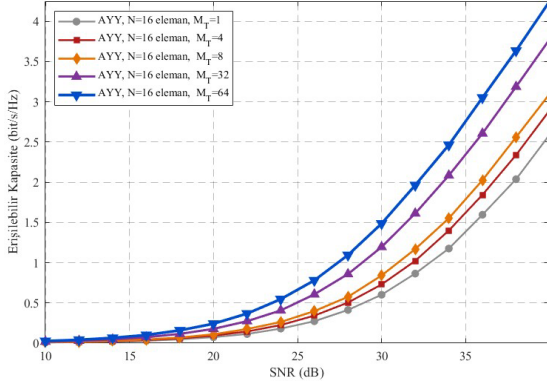


Şekil 5. AYY pozisyonunun performansa etkisi ($M_T = 64$).

Şekil 5'te ise AYY konumunun erişilebilir kapasite üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. AYY'nin konumu sistem boyunca değiştirildiğinde kapasite değerlerinin U-şekilli bir eğilim sergilediği dikkat çekmektedir. AYY'nin vericiye veya alıcıya daha yakın konumlandırıldığı durumlarda erişilebilir kapasite değerlerinin arttığı, buna karşın AYY'nin orta bölgelere konumlandırılması durumunda kapasitenin azaldığı gözlemlenmektedir. Bunun temel nedeni, AYY'nin vericiye veya alıcıya yakın konumlarda daha güçlü yansıtılmış bağlantılar oluşturabilmesidir. Ayrıca, AYY üzerindeki yansıtıcı eleman sayısı arttıkça sistem performansının önemli ölçüde iyileştiği görülmektedir. Örneğin, $N=16$ elemanlı durumda kapasite değerleri daha düşük seviyelerde kalırken, eleman sayısının $N=256$ 'ya çıkarılması ile erişilebilir kapasitenin tüm konumlar boyunca belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, AYY'siz iletim durumunda elde edilen kapasite değeri ($C=2,61$ bit/s/Hz) ile karşılaştırıldığında, AYY destekli iletimin sistem kapasitesinde ciddi bir iyileşme sağladığı açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar, yoğun MIMO sistemlerinde AYY konumlandırmasının ve eleman sayısının sistem performansını doğrudan etkileyen kritik parametreler olduğunu ortaya koymaktadır.

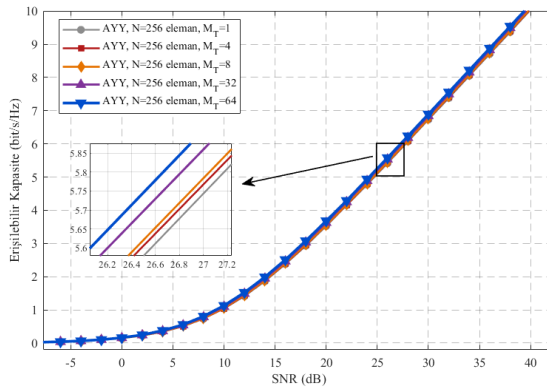
Şekil 6 incelendiğinde, verici anten sayısının (M_T) erişilebilir kapasite üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir. SNR değerinin artmasıyla birlikte tüm verici anten konfigürasyonlarında erişilebilir kapasitenin monoton olarak arttığı gözlemlenmektedir.

Bununla birlikte, verici anten sayısının artırılması sistem performansında belirgin bir iyileşme sağlamaktadır. Özellikle düşük SNR bölgelerinde kapasite artışı sınırlı kalırken, SNR değerinin yükselmesiyle birlikte farklı anten sayıları arasındaki performans farkı daha belirgin hale gelmektedir.



Şekil 6. Verici anten sayısının performansa etkisi ($N = 16$).

Şekil 6'da, $N = 16$ elemanlı AYY kullanıldığı durumda $M_T = 1, 4, 8, 32$ ve 64 anten konfigürasyonları karşılaştırıldığında, verici anten sayısının artmasıyla erişilebilir kapasitenin önemli ölçüde yükseldiği görülmektedir. Bunun temel nedeni, verici anten sayısındaki artışın uzamsal çeşitlilik ve kazanç sağlayarak kanalın daha verimli kullanılmasına olanak tanınmasıdır. Elde edilen bu sonuçlar, AYY destekli sistemlerde verici anten sayısının artırılmasının özellikle yüksek SNR koşullarında sistem kapasitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.



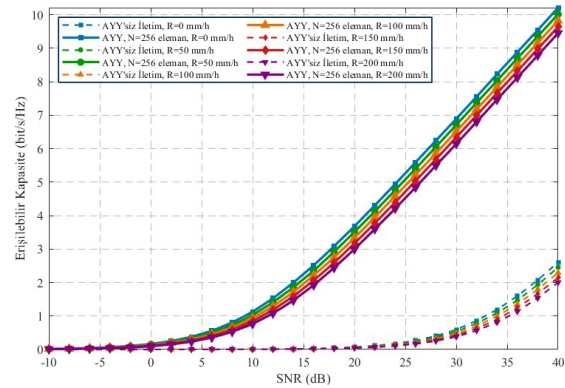
Şekil 7. Verici anten sayısının performansa etkisi ($N = 256$).

Şekil 7 incelendiğinde, $N = 256$ elemanlı AYY kullanılan yoğun MIMO sisteminde verici anten sayısının (M_T) erişilebilir kapasite üzerindeki etkisi gösterilmektedir. SNR değerinin

artmasıyla birlikte tüm anten konfigürasyonlarında erişilebilir kapasitenin monoton olarak arttığı gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, verici anten sayısının artırılması kapasiteyi artırsa da eğriler arasındaki farkın sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir. Bu durum, AYY'nin sistem performansı üzerinde baskın bir rol oynadığını göstermektedir.

Şekil 7'de görüldüğü üzere, $M_T = 1, 4, 8, 32$ ve 64 olmak kaydıyla, geniş anten aralığına rağmen elde edilen kapasite eğrileri birbirine oldukça yakın seyretmektedir. Bu durum, yeterli sayıda AYY elemanı kullanıldığında, AYY'nin sağladığı yansıtma kazancı ve kanal yeniden yapılandırma yeteneğinin sistem performansını belirleyen temel faktörlerden biri haline geldiğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, yüksek sayıda AYY elemanının kullanılması, baz istasyonundaki anten sayısının artırılmasıyla elde edilecek kazançların önemli bir kısmını telafi edebilmektedir.

Dolayısıyla AYY, yoğun MIMO sistemlerinde doğrudan anten sayısını artırmanın yerine geçen bir yapıdan ziyade sistemi destekleyen ve tamamlayan bir teknoloji olarak değerlendirilebilir. Özellikle yüksek eleman sayısına sahip AYY kullanımı sayesinde, daha düşük sayıda BS anteni ile benzer kapasite performanslarına ulaşılabilmesi mümkün olmaktadır. Bu sonuçlar, mmWave haberleşme sistemlerinde AYY kullanımının sistem maliyetini ve donanım karmaşıklığını azaltırken performansı koruyabilen önemli bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 8. Yağmurun performansa etkisi ($M_T = 64, N = 256$).

Şekil 8 incelendiğinde, yağış yoğunluğunun sistemin erişilebilir kapasitesi üzerindeki etkisi açık bir şekilde gözlemlenmektedir. SNR değerinin artmasıyla birlikte hem AYY destekli hem de AYY'siz iletim durumlarında erişilebilir kapasitenin artış gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte, yağmur şiddetinin artması kanal zayıflamasına neden olduğundan sistem performansında belirli bir düşüş meydana gelmektedir.

Şekil 8'de farklı yağış yoğunlukları ($R = 0, 50, 100, 150$ ve 200 mm/h) için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, yağmur oranı arttıkça erişilebilir kapasitenin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Özellikle yüksek SNR bölgelerinde bu etkinin daha belirgin hale geldiği dikkat çekmektedir. Bunun temel nedeni, mmWave frekanslarında yağmur damlalarının elektromanyetik dalgalar üzerinde önemli seviyede soğurma ve saçılma etkisi oluşturmasıdır.

Öte yandan, $N = 256$ elemanlı AYY kullanıldığı durumda elde edilen kapasite değerlerinin tüm yağış koşullarında AYY'siz iletim durumuna kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, AYY'nin sağladığı yansıtma kazancı sayesinde kanal kayıplarının kısmen telafi edilebildiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, yoğun MIMO sistemlerinde olumsuz hava koşullarının sistem performansını düşürmesine rağmen AYY destekli iletim yapısının kapasiteyi artırarak haberleşme kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada yoğun MIMO sistemlerinde kanal kapasitesini etkileyen temel parametreler incelenmiş ve mmWave frekans bantlarında çalışan kablosuz haberleşme sistemlerinin performansı değerlendirilmiştir. Özellikle mmWave haberleşmede ortaya çıkan yayılım kayıpları ve yağmur zayıflaması gibi çevresel etkilerin sistem kapasitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca, verici ve alıcı arasında doğrudan görüş hattının zayıf olduğu senaryolarda AYY destekli iletim yapısı ele alınmış ve AYY eleman sayısı, iletim yapan anten sayısı, AYY konumu ve yağış şiddeti gibi parametrelerin erişilebilir kapasite üzerindeki etkileri sayısal simülasyonlar aracılığıyla incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, AYY kullanımının özellikle mmWave haberleşme

ortamında sistem performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve yoğun MIMO sistemleri ile birlikte kullanıldığında tamamlayıcı bir rol üstlenerek kanal kapasitesinin artırılmasına katkı sağladığını göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, AYY destekli yoğun MIMO sistemlerinde faz kontrolü, kanal kestirimi ve farklı kanal koşullarında performans analizlerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Karaman, B., Basturk, I., Kara, F., Ozturk, M., Taskin, S. ve Yanikomeroglu, H., "On the Trade-Off Between Sum-Rate and Energy Efficiency through the Convergence of HAPS and Active RIS Technologies", 2025 IEEE 36th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Sayfa 1–6, 2025.
2. Shoukat, H., Khurshid, A.A., Daha, M.Y., Shahid, K. ve Hadi, M.U., "A comparative analysis of DNN and conventional signal detection techniques in SISO and MIMO communication systems", Telecom, Cilt 5, Sayı 2, Sayfa 487–507, 2024.
3. Ahmad, A. ve Agarwal, S., "Adaptive ML MISO receiver: Conditional fine-tuning without CSI", IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2025.
4. Cui, M., Zeng, Q. ve Huang, K., "Multi-user SIMO wireless communications based on atomic receivers", IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Sayfa 4101–4106, 2024.
5. Khoshafa, M. H., Ngatched, T. M., Ahmed, M. H., Gadallah, Y. ve Niyato, D., "RIS-empowered rate-splitting multiple access towards 6G and beyond wireless communications networks: A comprehensive survey", IEEE Internet of Things Journal, 2025.
6. Xie, H. ve Li, D., "Number configuration for RIS-aided systems: Opportunities and challenges", IEEE Internet of Things Journal, Cilt 12, Sayı 6, Sayfa 6396–6417, 2025.
7. Khoshafa, M. H., Bueno, F., Ngatched, T. M. ve Di Renzo, M., "RIS-empowered secured space-air-ground integrated networks: Opportunities and challenges", IEEE Communications Magazine, 2025.
8. Lu, Y., Zhang, J., Shi, E., Zhang, P., Ng, D. W. K., Niyato, D. ve Ai, B., "Energy-efficient RIS-aided cell-free massive MIMO systems: Application, opportunities, and challenges", IEEE Wireless Communications, 2025.

9. Zhi, K., Pan, C., Ren, H. ve Wang, K., “Statistical CSI-based design for reconfigurable intelligent surface-aided massive MIMO systems with direct links”, *IEEE Wireless Communications Letters*, Cilt 10, Sayı 5, Sayfa 1128–1132, 2021.
10. Marinello Filho, J. C., Abrão, T., Hossain, E. ve Mezghani, A., “Reconfigurable intelligent surfaces-enabled intra-cell pilot reuse in massive MIMO systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Cilt 23, Sayı 8, Sayfa 9446–9459, 2024.
11. Zhang, J., Qi, C., Li, P. ve Lu, P., “Channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided massive MIMO system”, 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Sayfa 1–5, 2020.
12. He, J., Yu, K., Shi, Y., Zhou, Y., Chen, W. ve Letaief, K. B., “Reconfigurable intelligent surface assisted massive MIMO with antenna selection”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Cilt 21, Sayı 7, Sayfa 4769–4783, 2022.
13. Zhang, Y., Zhao, H., Xia, W., Xu, W., Tang, C. ve Zhu, H., “How much does reconfigurable intelligent surface improve cell-free massive MIMO uplink with hardware impairments?”, *IEEE Transactions on Communications*, Cilt 71, Sayı 11, Sayfa 6677–6694, 2023.
14. Liu, T., Yang, X., Jiang, H., Zhang, H. ve Chen, Z., “Reconfigurable intelligent surface enhanced massive connectivity with massive MIMO”, *IEEE Transactions on Communications*, Cilt 71, Sayı 12, Sayfa 7441–7454, 2023.
15. Larsson, E. G., Edfors, O., Tufvesson, F. ve Marzetta, T. L., “Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems”, *IEEE Communications Magazine*, Cilt 52, Sayı 2, Sayfa 186–195, 2013.
16. Marzetta, T. L., “Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Cilt 9, Sayı 11, Sayfa 3590–3600, 2010.
17. Ashraf, A., Gunawan, T.S., Kartiwi, M., Nur, L.O., Nugroho, B.S. ve Astuti, R.P., “Advancements and challenges in scalable modular antenna arrays for 5G massive MIMO networks”, *IEEE Access*, Cilt 12, Sayfa 57895–57916, 2024.
18. Sambhwani, S., Chae, H., Chiu, S.E., Fan, B., Sarkas, I., Sun, W. ve Zhu, X., “Extending mmWave deployment in the next-generation network: Coverage and reliability enhancements”, *IEEE Wireless Communications*, Cilt 32, Sayı 1, Sayfa 83–89, 2025.
19. Wang, M., He, D., Duan, H., Liu, T., Liu, J., Zhang, Y. ve Guan, K., “Measurement and Modeling of Rain Attenuation for Short-Range Millimeter-Wave Channels”, 2025 IEEE 102nd Vehicular Technology Conference (VTC2025-Fall), Sayfa 1–5, 2025.