

## 60 GHz mm-Dalga Bandı için Üç Boyutlu Bina İçi Büyükölçek ÇGÇÇ Kanal Modelleme

Barış Yüksekaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06800 ANKARA

\*barisy@ee.hacettepe.edu.tr

(Geliş/Received: 02.03.2018; Kabul/Accepted: 19.05.2018)

### Özet

Bu makalede, beşinci nesil (5G) 60 GHz milimetre dalga (mm-dalga) çok girdili çok çıkıtlı iletişim sistemleri için bina içi üç boyutlu (3D) kanal modelleme işlemleri bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. 5G iletişim sistemlerinde kullanılacak en önemli aday teknolojilerden biri olan mm-dalga iletişimde kanal karakteristik özelliklerinin modellenmesi önem taşımaktadır. Ancak, mm-dalga iletişiminin bu önemine rağmen literatürdeki kanal modelleme çalışmaları yeterli değildir. Bu çalışmada literatürde katkıda bulunmak amacıyla bilgisayar ortamında kanal modelleme ve çoklu yol kanal katsayıları hesaplanması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kanal modelleme işleminde iletişim ortamının, verici anten dizisinin ve alıcı anten dizilerinin geometrileri ortaya çıkartılmıştır ve ışın takip etme yöntemi ile tüm çoklu yol kanalları hesaplanmıştır. Modellemesi gerçekleştirilen mm-dalga kanalların başarımlarının incelenmesi için çoklu yol gecikme yayılımı ve çoklu yol güç içeriği sonuçları incelenmiştir ve gelecekteki donanım uygulamalarını test etmek için kullanılacak yararlı bir simülasyon elde edilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda incelenilen mm-dalga kanalların gecikme yayılımının uzunluğu nedeniyle frekans seçici kanallar olduğu ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:**Kablosuz İletişim, Beşinci Nesil İletişim Sistemleri, Büyükölçek ÇGÇÇ, Kanal Modelleme, Işın Takip Etme.

## Three Dimensional Indoor Massive MIMO Channel Modelling for 60 GHz mm-Wave Channel

### Abstract

In this paper, an indoor three dimensional (3D) channel modelling scheme is realized for fifth generation (5G) 60 GHz millimeter wave (mm-wave) multiple input multiple output communication systems using computer simulations. It is important to model channel characteristics of mm-wave communication which is one of the most important candidate technologies to be used in 5G communication systems. However, despite the importance of mm-wave communication, channel modeling studies in the literature are not sufficient. In this study, channel modeling and computation of multipath channel coefficients were performed in the computer environment for the purpose of contributing to the literature. In the channel modeling process, the geometry of the communication medium, the transmitting antenna array and the receiving antenna array are generated, and all multipath channels are calculated by ray tracing method. In order to investigate the performance of the modeled mm-wave channels, multi-path delay propagation and multi-path power content are examined and a useful simulation that will be used for testing future hardware applications is obtained. The performed simulations showed that the mm-wave channels studied are frequency-selective in nature due to the length of multi-path delay propagation.

**Keywords:** Wireless Communications, Fifth Generation Communication Systems, Massive MIMO, Channel Modelling, Ray Tracing.

### 1. Giriş

İletişim endüstrisinin en hızlı büyüyen parçası kablosuz iletişim teknolojileri olarak düşünülmektedir [1]. Yakın gelecekte, toplumun, endüstri ve hizmet sektörlerinin artan bir eğilimle yeni nesil haberleşme teknolojilerine daha

bağımlı hale gelecekleri açıktır [2]. Tüm dünyada kablosuz ağlara erişen kablosuz cihazların sayısı hızlı bir artış sergilemektedir. Cisco tarafından 2017 başında yapılan tahminlere göre [3], 2021 yılında mobil cihazlar ve bağlantılar 11.6 milyar sayısına ulaşacak ve dünyanın nüfusunu geçecektir. Ayrıca, dünya çapındaki aylık mobil

veri trafiğinin de 49 Exabit'i ( $49 \times 10^{18}$ ) geçeceği tahmin edilmektedir. Bu rakam 2013 yılında ölçülen değerlerin 30 katından daha fazladır. Bu gibi sebepler nedeniyle, servis kalitesi (Quality of Service, QoS) kısıtları altında yüksek veri hızları sağlamak adına yeni teknolojiler ve çözümler bulunması gerekmektedir. Bu bağlamda, özellikle bant genişliği kablosuz sistemler için önemli bir kaynaktır. Çünkü artan kablosuz cihazlar, kullanılan bant genişliğini arttırmakta ve spektrum kıtlığına sebep olmaktadır. Bu durum, 5G iletişim sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç doğurmuştur ve sektör 5G için aday teknolojiler arayışına girmiştir. mm-dalga iletişim sistemleri 5G iletişimde kullanılması öngörülen en önemli adaylardandır [4].

Şu anki kablosuz servislerin çoğu 10 GHz bandının altında kalan frekans aralığını kullanmaktadır ve bu durum da artan bir yoğunluğa sebep olmaktadır. Bu nedenle, gelecek nesil 5G haberleşme sistemlerinde taşıyıcı frekanslarının, spektrumda yukarılara taşınması beklenmektedir. Bu durumun açık bir göstergesi, 60 GHz'lik mm-dalga bandında büyük bant genişliklerinin lisanssız kullanıma açılması olarak gösterilebilmektedir. Tahsis edilen bu frekans spektrumundaki dünya çapında kurallar hakkında detaylı bilgi [5]'te bulunabilir. Çoklu ortam (Multimedia) içeriklerinin hızla artışı da daha yüksek veri hızları için sürekli artan toplum talebinin sebeplerinden biri olarak gösterilmektedir. Milimetre-dalga sistemlerdeki 60 GHz bandındaki 7 GHz'e kadar kullanılacak spektrum aralığı 5G haberleşme sistemlerindeki veri hızı ihtiyacını karşılayabilecek en önemli adaylardandır.

Milimetre-dalga terimi 30-300 GHz aralığındaki geniş frekans bandını ve dalga boyunun 1-10 milimetre mertebesinde bulunduğu aralığı ifade etmektedir. Gelecek nesil kablosuz iletişim sistemlerindeki yüksek veri hızları ihtiyacı, araştırmacıların ve endüstrinin mm-dalga spektrumuna ilgisini gün geçtikçe arttırmaktadır [6-8]. Radar sistemlerinde ve iletişim sistemlerinde mm-dalga tekniklerinin kullanımının birçok fayda sağlaması beklenmektedir. mm-dalga frekans aralığının çekici olmasına gösterilebilecek birkaç sebep aşağıda sıralanmıştır:

- mm-dalga bandındaki kullanılabilir bant genişliği, düşük frekanslardakine göre çok

daha geniştir. Örneğin, 60 GHz etrafındaki %5'lik bir bant genişliği bile 3 GHz genişliğindedir ve kablosuz veri iletişimi için yeterli bir aralıktır.

- Ultra geniş bantların aksine yüksek güçte iletme izin verilmektedir ve daha fazla efektif yönbğımsız ışım gücü (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) kullanılabilir [9, 10].
- Halihazırda bu frekans bandındaki uygulamaların az olması sebebiyle daha düşük girişim değerleri gözlenecektir.
- mm-dalga aralığında anten boyutları dalga boyuyla beraber küçülecektir. Böylece antenleri ve alıcı ön uç sistemlerini içeren bir radyo frekansı (RF) sistemi küçük boyutlu olacak ve çok küçük kapalı sistemler haline getirilebilecektir.
- Kısa dalga boyunda çalışabilmek küçük boyutta anten kullanımına olanak sağlayacaktır ve bu da küçük bir alan içerisine çok sayıda anten sıkıştırılabilmesini sağlayacaktır. Böylece çok sayıda (büyük ölçek) anten kullanılarak dizi kazancı ve/veya anten çeşitleme kazancı artacaktır.

Birçok avantajı ve faydası olduğu belirtilen mm-dalga frekanslarının, bu avantajlarına rağmen, halihazırda uygulamalarda kullanılabilmesi için araştırılmaya ve geliştirilmeye ihtiyacı vardır. mm-dalga kablosuz kanallarındaki yayılım özellikleri düşük frekans bantlarına göre birçok farklılık göstermektedir. Örneğin, düşük frekanslara kıyasla mm-dalga frekansında boşluk-uzay yol kaybı (Free-Space Pathloss), taşıyıcı frekansının karesiyle ters orantılı olduğu için [11], daha fazladır. Girim kaybı (Penetration Loss) ve gölgeleme etkisi (Shadowing) de yol kaybı gibi daha etkilidir [12]. Sonuç olarak, genellikle iletişim menzili kısadır. Bu sebeple, mm-dalga sistemlerinin geliştirilmesi için, bu kablosuz kanalların karakterize edilmesi, modellenmesi ve hesaplanması gerekmektedir. mm-dalga bandının önemine rağmen, kablosuz iletişim için genel 60 GHz kanal modellerinin eksikliği vardır. Örneğin, Almanya'da yapılan çalışmada [13], ışın takip etme yöntemi kullanılarak kanal modelleme gerçekleştirilmiş ancak iki boyutlu bir modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yatay ekseninde alıcıya gelen sinyallere ek olarak farklı yüksekliklerden gelebilecek sinyaller de göz

önüne alınarak üç boyutlu modelleme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca literatürdeki benzer kanal modelleme çalışmalarının bir kısmında da [14, 15] alıcıda ve vericide tek anten kullanılarak kanal katsayıları hesaplanmıştır. Ancak mm-dalga sistemlerinin çok sayıda anten kullanımına izin verebilmesi sebebiyle anten sayısını tek antende tutmak pratiklikten uzak sonuçlar elde edilmesine sebep olmaktadır. Literatürdeki eksikliğin üstesinden gelebilmek için kapsamlı kanal modellemesi ve istatistiksel analiz gereklidir.

Bu çalışmanın temel amacı, 60 GHz mm-dalga bandı iletişim özelliklerini ortaya koyabilmek için üç boyutlu (3D) bina içi büyük ölçek çoklu giriş çoklu çıkış (ÇGÇÇ) kanal modelleme işlemlerini gerçekleştirmektir. Kanal modelleme işleminde ışın takip etme (Ray Tracing) [16] yöntemi kullanılacaktır. Işın takip etme yönteminde duvarlardan yansıyan ışınların geometrilerinin çıkartılabilmesi için de ayna yansıması (Mirror Image) tekniği kullanılmaktadır. Üç boyutlu modelleme işlemi için önce iki boyutlu modelleme gerçekleştirilecektir ve sonrasında taban ve tavan yansıma ışınları bulunarak üç boyuta geçilecektir. Modellemesi gerçekleştirilen kanalların iletişim özelliklerinin incelenmesi için çoklu-yol gecikme (Multipath Delay) ve çoklu-yol güç içeriği (Multipath Delay Content) gibi mm-dalga kanal özellikleri araştırılmıştır.

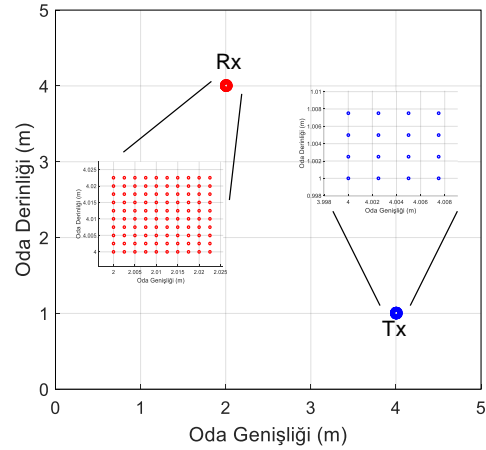
Bu makalenin en önemli katkısı, gerçekçi 60 GHz kablosuz kanal modellerinin eksikliğini gidermek olarak düşünülmektedir. Bu durumun üstesinden gelmek için kapsamlı kanal modellemesi ve istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir, iç mekan 60 GHz mm-dalga bandının özellikleri araştırılmıştır ve büyük ölçek ÇGÇÇ kanal modelleri elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen mm-dalga sistem modellemeleriyle, gelecekte yapılabilecek dizilim işleme teknikleri için bir genel çerçeve oluşturulmuştur.

## 2. Sistem Modeli

Kanal modellemesi için ilk olarak sistem modeli ve geometrisi oluşturulmalıdır. Verici ve alıcıdaki anten sayılarına karar verilmeli ve verici ve alıcının konumları bilinmelidir. Sonrasında verici anten(ler)den alıcı anten(ler)e yönlenecek olası ışınların geometrileri incelenmelidir.

Çalışmada kapalı ortam 5m×5m×3m'lik bir oda içerisinde bir verici ve bir alıcı olduğu varsayılmıştır. Üç boyutlu tasarıma geçilmeden önce iki boyutlu (taban ve tavan yansımaları göz ardı edilerek) modelleme gerçekleştirilecektir. Sonrasında ihmal edilen yansımalar da modele eklenerek üç boyutlu modelleme tamamlanacaktır.

Şekil 1'de çok antenli verici-alıcı çifti senaryosu (büyükölçek ÇGÇÇ senaryo incelemesi için vericide 16, alıcıda 100 adet anten) kuş bakışı olarak (iki boyutlu) gösterilmektedir. Tx verici anten dizisini, Rx'de alıcı anten dizisini ifade etmektedir.



Şekil 1. MIMO kanal senaryosu. Anten konumları büyütülmüş olarak da gösterilmektedir.

Kapalı odanın hem genişliği hem de derinliğinin 5m olduğu, yüksekliğinin de 3m olduğu varsayılmıştır. Hesaplama ve anlatım kolaylığı açısından verici ve alıcının aynı yükseklikte olduğu düşünülmüştür.

Çok antenli sistemlerde kanal modellemesi yapılırken, tüm antenlerden kaynaklanan çoklu yolların hesaplanmasının yaratacağı işlem fazlalığının azaltılması için, tek anten çiftinin referans olarak alınması ve bu referans kanal bilgisi kullanılarak çoklu anten kanal modellemesinin gerçekleştirilmesi literatürde sıklıkla kullanılmaktadır [17]. Referans anten kullanılarak elde edilen tek antenli kanal dürtü yanıtının verici ve alıcı dizi vektörleriyle çarpılması yoluyla da çok antenli senaryo kanal dürtü yanıtı hesaplanmaktadır. İlgili formülasyon aşağıda gösterilmektedir.

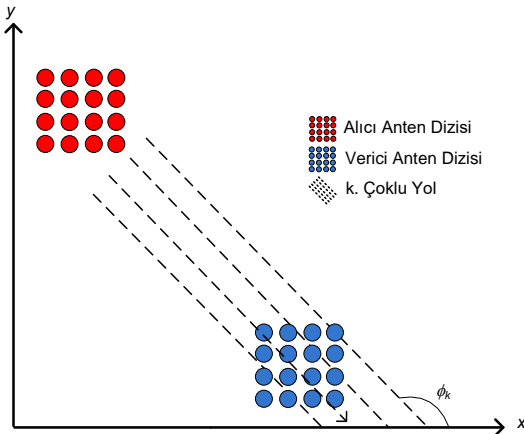
$$\tilde{\mathbf{H}}(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{v}_{r,k} \mathbf{v}_{t,k}^T \alpha_k e^{j\phi_k} \delta(t - \tau_k), \quad (1)$$

Burada  $K$  vericiden alıcıya giden yol sayısını göstermektedir,  $\alpha_k$ ,  $\tau_k$  ve  $\phi_k$  sırasıyla  $k$ . yoldaki genliği, zamanda gecikmeyi ve fazı göstermektedir. Ayrıca,  $\mathbf{v}_{t,k}$  ve  $\mathbf{v}_{r,k}$  sırasıyla  $k$ . yoldaki verici ve alıcı dizi vektörlerini göstermektedir. Bu dizi vektörleri anten dizisi elemanlarının faz kaymalarını göstermekte ve

$$\mathbf{v}_{t,k} = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi f_c \frac{\mathbf{r}_1^T \mathbf{a}_k}{c}} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi f_c \frac{\mathbf{r}_{N_{Tx}}^T \mathbf{a}_k}{c}} \end{bmatrix}, \mathbf{v}_{r,k} = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi f_c \frac{\mathbf{r}_1^T \mathbf{a}_k}{c}} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi f_c \frac{\mathbf{r}_{N_{Rx}}^T \mathbf{a}_k}{c}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_n = \begin{bmatrix} r_{n_x} \\ r_{n_y} \\ r_{n_z} \end{bmatrix}, \mathbf{a}_k = \begin{bmatrix} -\sin \theta_k \cos \phi_k \\ -\sin \theta_k \sin \phi_k \\ -\cos \theta_k \end{bmatrix},$$

yapısında dırlar. Burada  $f_c$  taşıyıcı frekansını,  $c$  ışık hızını,  $\mathbf{r}_n$  vektörü  $n$ . antenin koordinatlarını,  $\mathbf{a}_k$  vektörü  $k$ . çoklu yolun geliş-gidiş açısıl pozisyon vektörünü,  $(\theta_k, \phi_k)$  çifti de eğim açısı ve azimut açısını göstermektedir. Antenlerin konumları ve eğim açısı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Anten koordinatları ve açısıl pozisyonun gösterildiği sistem geometrisi.

Bu durumda referans olarak seçilen anten çiftinin oluşturduğu çoklu yollar için genlik, zamanda gecikme ve faz hesaplandıktan sonra büyükölçek ÇGÇÇ kanal modellemesi tamamlanabilecektir. Öncelikle ayna yansımaları yöntemi ile duvarlardan yansıma sonucu oluşan çoklu yollar bulunacaktır.

Genlik katsayısı yol kaybı ( $PL_k$ ), oksijen emilimi kaynaklı kayıp ( $OL_k$ ) ve yansıma kaybı ( $RL_k$ ) terimlerine bağlı bir ifadedir. Yol kaybı frekansa ve uzaklığa bağlı bir ifadedir ve  $PL_k = \frac{4\pi d_k}{\lambda_c}$  şeklinde formülize edilmektedir.

Burada  $d_k$  terimi  $k$ . yolun katettiği mesafeyi,  $\lambda_c$  'de taşıyıcı dalga boyunu göstermektedir. Oksijen emilimi kaynaklı kayıp yaklaşık olarak kilometre başına 15dB olarak ölçülmektedir [9]. Matematiksel ifadesi de  $OL_k = 10^{d_k \cdot 1.5/1000}$  şeklindedir. Yansıma kaybı dalganın yansıdığı materyale ve geliş açısına bağlı olarak değişmektedir. Yansıma materyali dış mekanlarda granit ve iç mekanlarda alçı olarak kabul edilmektedir. Kayıplar geliş açısına bağlı bir tablodan seçilmektedir [4, 18]. Yol kaybı, oksijen emilimi kaynaklı kayıp ve yansıma kaybı terimleri hesaplandıktan sonra genlik kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\alpha_k = (PL_k \cdot OL_k \cdot RL_k)^{-1} \quad (3)$$

Sonrasında çoklu yollar büyükten küçüğe sıralanmakta ve en güçlü yol  $k=0$  indisini almaktadır. Eğer bir direkt görüş yolu (Line of Sight) varsa  $k=0$  indisini bu yol olarak seçilmektedir. Zamanda gecikme ve faz hesaplamalarında alıcının hem zaman hem de faz olarak en güçlü çoklu yol elemanı ile senkron olduğu varsayılmaktadır. Böylece, zamanda gecikme ve faz en güçlü yol'a göre ( $k=0$ ) hesaplanmaktadır.  $k$ . yolun zamanda gecikmesi, bu yolun katettiği mesafenin en güçlü yolun katettiği mesafeden farkının ışık hızına ( $c$ ) bölünmesi ile aşağıdaki şekilde

$$\tau_k = \frac{d_k - d_0}{c} \quad (4)$$

bulunmaktadır. Son olarak faz hesabında kullanılan matematiksel ifade ise

$$\psi_k = (\omega_c \tau_k + \pi N_{refl,k}) \bmod 2\pi \quad (5)$$

şeklindedir. Burada  $\omega_c$  radyan cinsinden taşıyıcı frekansını ve  $N_{refl,k}$  ise  $k$ . yolun toplam yansımaya sayısını göstermektedir. "mod" işlemi ölçeği işlemidir. Yukarıda anlatıldığı gibi ışın takip etme yöntemi ile her çoklu yolun özellikleri hesaplandıktan sonra Eş.1 kullanılarak ÇGÇÇ kanal dürtü yanıtı matrisi elde edilecektir.

### 3. Işın Takip Etme Yöntemi ile Işın Geometrisi Oluşturulması

Daha önce bahsedildiği gibi ilk olarak iki boyutlu kanal modelleme işlemi gerçekleştirilecek, sonrasında taban ve tavan yansımaları modele eklenerek üç boyut modelleme elde edilecektir. Bu kısımda ilk olarak iki boyutlu ÇGÇÇ modelleme anlatılacaktır.

#### 3.1. İki boyutlu modelleme

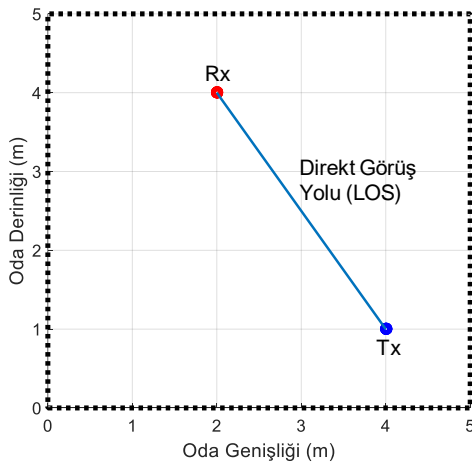
Şekil 1'de kuş bakışı gösterilen senaryoda alıcının koordinatları (2m,4m,1m) ve vericinin koordinatları da (4m,1m,1m) şeklindedir. İlk bulunacak yol direkt görüş yoludur (Line of Sight, LOS). Direkt görüş yolu vericiden alıcıya hiçbir

engelle karşılaşmadan çizilecek bir hattır ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

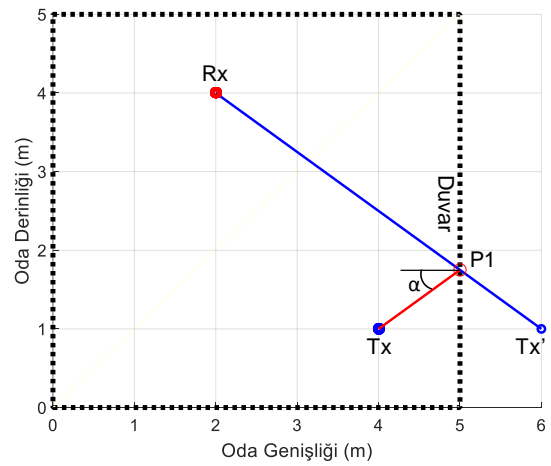
Duvarlardan yansıtılarak gelecek yolların bulunması ayna yansımaları yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Ancak sonsuz adet çoklu yolla karşılaşmaması için duvarlardan yansıtılarak oluşacak yollara bir sınır konulması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda gösterildiği gibi [17, 19, 20], duvarlardan birden fazla yansımaya uğrayan sinyallerin güçleri çok fazla kayba uğramaktadır ve göz ardı edilebilir duruma gelmektedirler. Bu sebeple genellikle tek yansımaya uğrayan (Birinci Derece Yansımaya) sinyaller ışın takibinde kullanılmaktadır.

Birinci derece yansımaya yollarının bulunması için vericinin tüm engellere (duvarlara) göre ayna yansımaları alınmalıdır ve bu ayna yansımaları kaynakmış gibi düşünülerek yansımaya-alıcı arasındaki yol hesaplanmalıdır. Bu yolun mesafesi yansıyan yolun mesafesini verecektir. Şekil 4'te gösterildiği gibi Tx' noktası vericinin birinci duvara göre ayna yansımasıdır. Tx'-P1 ve Tx-P1 eşit mesafededir. Bu durumda ilgili birinci derece yansımaya yolunun mesafesi Tx'-Rx arasındaki mesafe ile bulunacaktır ve yansımaya açısı ( $\alpha$ ) da sistem geometrisi kullanılarak bulunabilecektir. Bu şekilde tüm duvarlar için birinci derece yansımaya yolları vericinin ayna yansımaları ile hesaplanabilmektedir. Yansımaya açıları ( $\alpha$ ) daha sonra yansımaya kaybı hesabında kullanılacaktır.

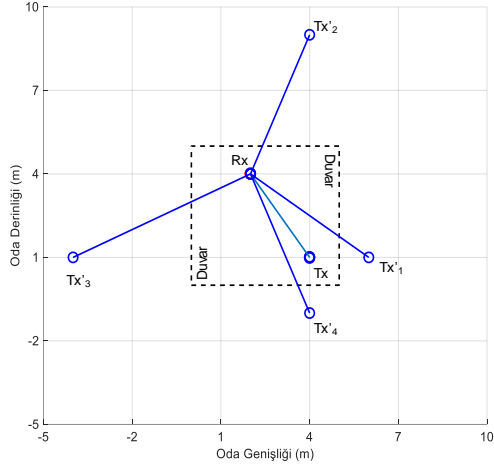
Yukarıda bahsedildiği gibi direkt görüş yolu ve birinci derece yansımaya hesaplandığında oluşacak çoklu yolların toplamı Şekil 4'te verilmektedir.



a)



b)

**Şekil 3. a) Direkt görüş yolu. b) Birinci derece yansıma örneği.****Şekil 4.** Anten koordinatları ve açısal pozisyonun gösterildiği iki boyutlu, kuş bakışı sistem geometrisi.

Bütün çoklu yol mesafeleri ve yansıma açıları bulunduğundan sonra iki boyutlu modelleme tamamlanacaktır ve üç boyutlu modellemeye geçilmesi için taban ve tavan yansımalarının geometrisinin bulunması gerekmektedir.

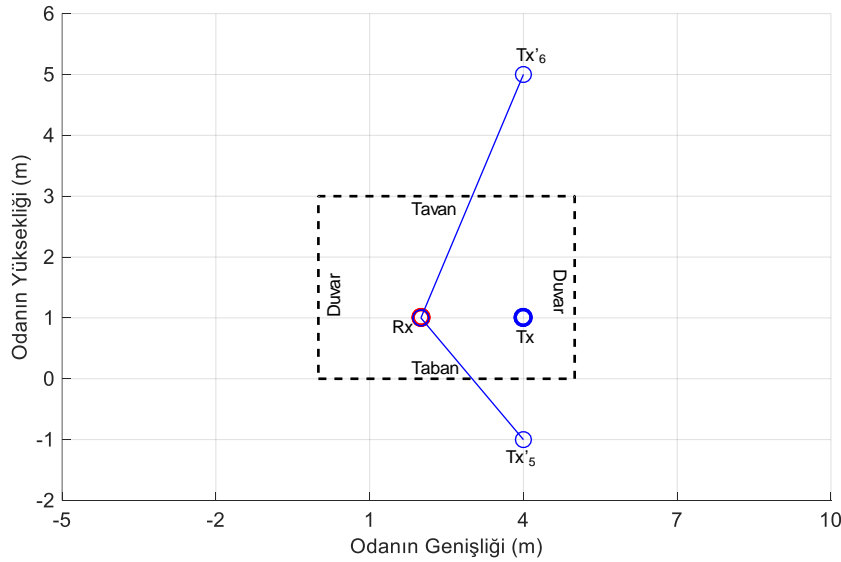
### 3.2. Taban ve tavan yansımaları

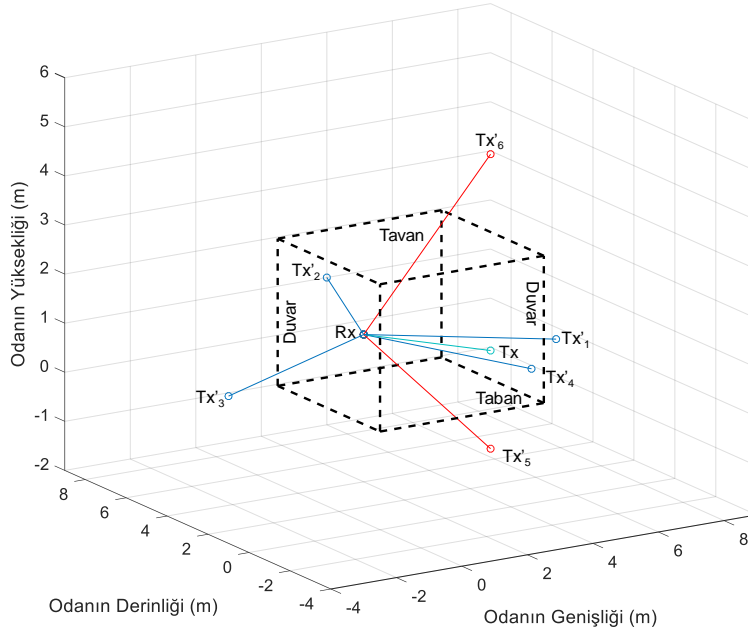
Taban ve tavadan yansyarak gelecek yolların geometrisi yine ayna yansıması yöntemiyle bulunacaktır. Ancak sonsuz adet çoklu yolla karşılaşılması için yine birden fazla yansıma uğrayan sinyaller göz ardı edilecektir ve birinci derece yansıma sinyaller kullanılacaktır.

İki boyutlu kuş bakışı modelleme kısmında olduğu gibi birinci derece yansıma yollarının bulunması için vericinin taban ve tavana göre ayna yansıması alınmalıdır ve bu ayna yansıması kaynakmış gibi düşünülerek yansıma-alıcı arasındaki yol hesaplanmalıdır. Şekil 5'te taban ve tavan'dan yansıyan birinci derece yansıma yolları gösterilmiştir (sırasıyla Tx'5 ve Tx'6).

Taban ve tavan yansımaları da bulunduğundan sonra kanal geometrisi tamamlanacaktır. Direkt görüş yolu ve birinci derece yansıma yollarının oluşturduğu üç boyutlu kanal çoklu yolların geometrisi Şekil 6'da verilmektedir.

Bulunan taban ve tavan yansımaları kullanılarak kanal dürtü yanıtı 2. Bölümde anlatıldığı gibi Eş. (1) ile hesaplanacaktır.

**Şekil 5.** Anten koordinatları ve açısal pozisyonun gösterildiği iki boyutlu, profil sistem geometrisi.



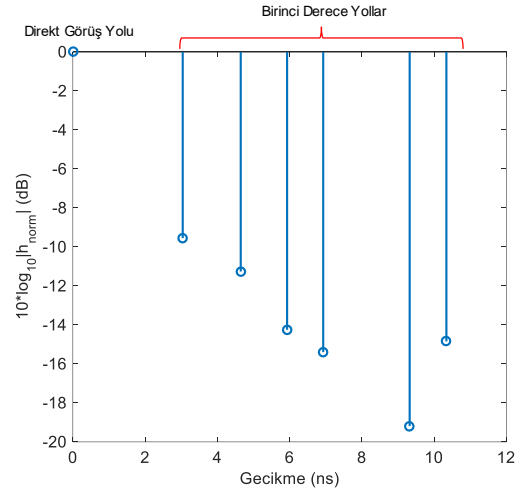
Şekil 6. Anten koordinatları ve açısal pozisyonun gösterildiği üç boyutlu sistem geometrisi.

#### 4. Simülasyonlar

Daha önceden bahsedildiği gibi mm-dalga bandı yüksek frekans bandı olduğu için yaşanacak kayıplar artacaktır, örneğin yol kaybı taşıyıcı frekansının karesi ile ters orantılıdır. Bununla beraber yüksek frekansta dalga boyu küçülecektir, dalga boyunun küçülmesi de daha küçük boyutlu antenlerin kullanılmasını ve antenler arasındaki mesafenin kısaltılmasını sağlamaktadır. Örneğin 60GHz bandında dalga boyu 5mm olacağı için antenler arasındaki mesafe 2.5mm olarak seçilebilmektedir. Bu da 10x10'luk bir anten dizisinin 2.5cm x 2.5cm'lik bir alanda toplanmasına olanak sağlayacaktır. Böylece 100 adet anten 6.25cm<sup>2</sup>'lik bir alana sıkıştırılacak ve anten çeşitliliği (antenna diversity) ile 100 antenin performansa etkisi incelenebilecektir. Çok sayıda anten kullanımını sistem performansının artmasını sağlayacaktır.

Şekil 1'de kuş bakışı ve Şekil 5'te profilden gösterilen ve modellemesi önceki bölümlerde anlatılan senaryoda verici anten matrisinin ilk elemanının koordinatları (4m,1m,1m)'dir ve alıcı anten matrisinin ilk elemanının koordinatları (2m,4m,1m) şeklindedir. Çok antenli alıcı senaryosunda vericide 16 ve alıcıda 100 adet anten olduğu varsayılmıştır. Senaryo geometrisi kullanılarak referans kanal dürtü yanıtı elde

edildikten sonra Eş.1 ile tüm antenler için toplam kanal dürtü yanıtı matrisi bulunacaktır. Şekil 7'de yukarıdaki örnek için referans anten çifti arasındaki simülasyonlar sonucu elde edilen normalize kanal dürtü yanıtı genliği verilmektedir.



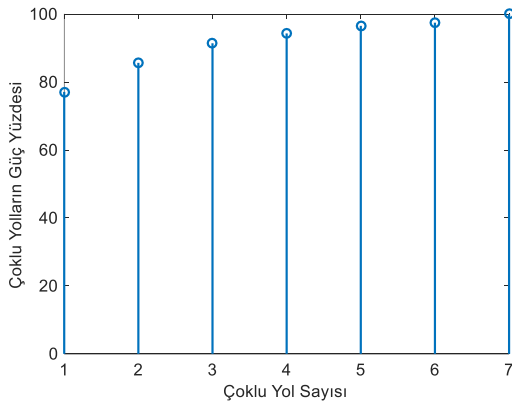
Şekil 7. ÇGÇÇ kanal senaryosunda modellenen referans anten çifti arasındaki kanal dürtü yanıtının normalize genlik-gecikme grafiği.

Şekil 7'de görüldüğü gibi direkt görüş yolu dürtüsü diğer çoklu yol dürtülerini domine etmektedir. Elde edilen kanal dürtü yanıtının

karakteristiklerinin incelenmesi için gecikme yayılması (Delay Spread) ve kanal dürtülerinin güçleri hesaplanmıştır.

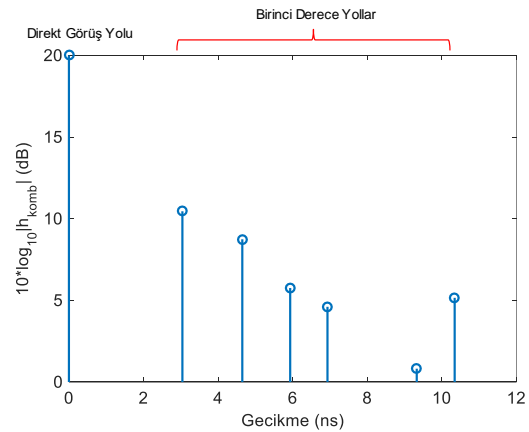
Kanal dürtü yanıtları detaylı incelendiğinde, son çoklu yolun gecikmesinin 10-12ns arasında olduğu görülmektedir. Bu değer gecikme yayılması olarak adlandırılır. Kapalı ortam odanın boyutları 5m×5m×3m olduğu için çoklu yol gecikmeleri diğer antenler için de 10-12ns bandının üzerine çıkmayacaktır ve yaklaşık olarak gecikme yayılması 12ns olarak hesaplanmıştır. Bu durumda evreyumlu bantgenişliği (Coherence Bandwidth) de yaklaşık olarak 83 MHz olarak hesaplanacaktır. 60GHz bandında mesaj sinyali bant genişliğinin 1-2 GHz aralığında olduğu bilinmektedir [18]. Bu durumda incelenen senaryo frekans seçici (Frequency Selective) bir kanal olacaktır [11]. Kanalın frekans seçici olmasından dolayı, negatif etkileri ortadan kaldırmak için, literatürde denkleştirme (Equalization) veya dikgen frekans bölüşümlü çoklama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) yöntemleri kullanılmaktadır [11, 21]. Önerilen mm-dalga senaryosunda da bu teknolojilerin kullanılması gerekmektedir.

Şekil 8'de farklı sayıda çoklu yolların güçlerinin toplam kanal gücüne göre yüzdesel oranları verilmektedir. Grafik incelendiğinde toplam gücün %80'e yakınının direkt görüş yolunda olduğu anlaşılmaktadır ve ilk 4 çoklu yolun toplam gücün %99'una sahip olduğu görülmektedir. Bu durumda kanalın modellenmesi işleminde en büyük önem direkt görüş yolunda ve ilk üç birinci derece yansıma çoklu yollarındadır.



Şekil 8. ÇKÇÇ kanal senaryosunda modellenen kanaldaki çoklu yolların güç yüzdesi.

Daha önce belirtildiği gibi, çok sayıda alıcı antenin kullanılmasının sonucu olarak iki tür performans artışı meydana gelebilir; bunlardan biri dizilim kazancı, diğeri ise alıcı anten çeşitliliğidir. Dizi kazancı, alınan sinyallerin uyumlu bir şekilde birleştirilmesiyle oluşmaktadır ve sönümlenme olmadığı durumlarda bile fayda sağlayabilmektedir. İkinci olarak anten çeşitliliğinin getireceği performans artışından bahsedilebilir. Bağımsız sönümlenme çoklu yollarının uyumlu birleştirilmesiyle elde edilecek daha güçlü kanallar anten çeşitliliği kazancı olarak adlandırılır. Her iki yöntemde de sinyallerin uyumlu birleştirilmesi gereklidir ve seçici birleştirme (Selective Combining), eşik değeri birleştirme (Threshold Combining) ve azami oran birleştirme (Maximal Ratio Combining) gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir [11]. Örnek olarak incelenilen senaryoda 100 adet alıcı anten çıktılarının mükemmel birleştirilmesiyle elde edilen kanal dürtü yanıtı Şekil 9'da verilmektedir. Sonuçları gösterilen mükemmel kombinasyon gerçek zamanlı çalışmalarda gerçekleştirilemez, ancak, mm-dalga bandında dizi kazançları ve anten çeşitliliği kazançları üzerinde bir fikir verebileceği için incelenmesinde yarar vardır. Şekil 7 ve Şekil 9 karşılaştırıldığında görüleceği üzere, alıcıda 100 adet antenin mükemmel birleştirilmesi sayesinde tüm çoklu yollarda yaklaşık olarak 20dB kazanç elde edilmiştir.



Şekil 9. ÇKÇÇ kanal senaryosunda modellenen alıcı antenlerinin mükemmel birleştirilmesi sonucu oluşan kanal dürtü yanıtının genlik-gecikme grafiği.



## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, büyükölçek çoklu giriş çoklu çıkış (ÇGÇÇ) kanallar için bina içi 60 GHz mm-dalga bandının özelliklerinin anlaşılması için gerekli kanal modelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca literatürdeki gerçekçi uygulamalar için kullanılabilir 60 GHz ÇGÇÇ kanal modellerinin eksikliği giderilmeye çalışılmıştır.

Elde edilen kanal modelleri ışın takip etme ve ayna yansıması yöntemleri kullanılarak oluşturulmuştur. Modellenen kanallar için kanal dürtü yanıtı oluşturulmuş ve güç içeriği ve çoklu yol gecikme yayılımı gibi özellikleri bakımından incelenmiştir. Gerçeklenen bilgisayar simülasyonlarında direkt görüş yolunun üstünlüğü gösterilmiştir.

Buna ilave olarak, gecikme yayılımının uzunluğu nedeniyle kapalı ortam kanalın frekans seçici olduğu gösterilmiştir. Kanalın frekans seçici olması ve mm-dalga kanallarda daha fazla etkili olan yol kaybı, girim kaybı ve gölgeleme etkisi gibi kanal koşulları ile mücadele etmek adına çeşitli teknikler geliştirilmesi gerekmektedir. Gelecek çalışmalarda dizilim işleme (Array Processing) teknikleri ve OFDM tabanlı mm-dalga alıcılar gibi frekans seçici kanallarla baş edebilecek yapıların kullanılması gerektiği ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada saçılma (Scattering) etkisi incelenmemiştir. Daha doğru kanal modelleri elde edebilmek adına gelecek çalışmalarda saçılma etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, bilgisayarla modelleme gerçekleştirildikten sonra kanal analizörler ve kanal alıcıları ile tasarlanan sistemlerin gerçek çıktıları simülasyon çıktıları ile karşılaştırılarak daha gerçekçi modeller geliştirilmesi gelecekteki çalışmalar için göz önünde bulundurulmalıdır.

Daha önce bahsedildiği gibi, gerçekleştirilen büyükölçek ÇGÇÇ senaryo alıcısında 100 adet anten kullanılmıştır. mm-dalga sistemlerin kısa dalga boyu sayesinde antenler arasındaki mesafe çok kısa tutulabilmektedir ve 100 adet anten yaklaşık olarak sadece 6.25 cm<sup>2</sup> alan kaplayacaktır. Böylece gerçek zamanlı sistemlerde çok sayıda anten çok küçük bir alana

sıkıştırılarak kullanılabilir ve dizi kazancı ve anten çeşitliliği kazancı elde edilebilecektir.

## 6. Teşekkür

Bu çalışma Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBI-2016-9815 numaralı Uluslararası Bilimsel İşbirliği Geliştirme kapsamında desteklenmiştir.

## 7. Kaynaklar

1. Akın, M., Çakır, M., Yıldız, D., Özgen, H. ve Yarkan, S. (2015). A low-cost, real-time, and short-range software-defined digital wireless communications transceiver design and implementation at baseband. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **30(2)**: 217-224.
2. Yıldırım Okay, F. ve Özdemir, S. (2015). Improving coverage in wireless sensor networks using multi-objective evolutionary algorithms. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **30(2)**: 143-153.
3. Index, C.V.N. (2017). Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2016-2021.
4. Rappaport, T.S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G.N., Schulz, J.K., Samimi, M. ve Gutierrez, F. (2013). Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!. *IEEE Access*, **1**: 335-349.
5. Yong, S.K. ve Chong, C.-C. (2007). An overview of multigigabit wireless through millimeter wave technology: Potentials and technical challenges. *EURASIP J. Wireless Commun. and Networking*, **1**: 50-50.
6. Brady, J., Behdad, N. ve Sayeed, A.M. (2013). Beamspace MIMO for millimeter-wave communications: System architecture, modeling, analysis, and measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **61(7)**: 3814-3827.
7. Gupta, A. ve Jha, R.K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE Access*, **3**: 1206-1232.
8. Agiwal, M., Roy, A. ve Saxena, N. (2016). Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **18(3)**: 1617-1655.
9. F.C.C. (1997). Millimeter-wave propagation: Spectrum management implications. *Federal Communications Commission Document*.

10. Xiao, S., Zhou, M. ve Zhang, Y. (2008). Millimeter Wave Technology in Wireless PAN, LAN, and MAN. CRC Press.
11. Goldsmith, A. (2005). Wireless Communications. Cambridge University Press.
12. Smulders, P. (2002). Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: prospects and future directions. *IEEE Communications Magazine*, **40(1)**: 140-147.
13. German, G., Spencer, Q., Swindlehurst, L. ve Valenzuela, R. (2001). Wireless indoor channel modeling: Statistical agreement of ray tracing simulations and channel sounding measurements. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'01)*, **4**: 2501-2504.
14. Gaddar, M., Talbi, L. ve Denidni, T.A. (2003). Millimeter wave propagation modelling for indoor high-speed PC systems, *International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2003)*, **2**: 767-770.
15. Sasmal, S., Mishra, S., Behera, B.R. ve Bandopadhaya, S. (2016). Ray tracing channel model for millimeter-(mm-) wave systems. *IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, 281-284.
16. Gustafson, C., Haneda, K., Wyne, S. ve Tufvesson, F. (2014). On mm-wave multipath clustering and channel modeling. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **62(3)**: 1445-1455.
17. Torkildson, E., Madhow, U. ve Rodwell, M. (2011). Indoor millimeter wave MIMO: Feasibility and performance. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **10(12)**: 4150-4160.
18. Samimi, M.K. ve Rappaport, T.S. (2014). Characterization of the 28 GHz millimeter-wave dense urban channel for future 5G mobile cellular. *Technical Report TR 2014-001*.
19. MacCartney, G.R., Zhang, J., Nie, S. ve Rappaport, T.S. (2013). Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 3948-3953.
20. Sulyman, A.I., Nassar, A.T., Samimi, M.K., MacCartney, G.R., Rappaport, T.S. ve Alsanie, A. (2014). Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimeter-wave bands. *IEEE Communications Magazine*, **52(9)**: 78-86.
21. Nee, R.V. ve Prasad, R. (2000). OFDM for Wireless Multimedia Communications. Artech House, Inc.