

**DÜŞÜK PROFİL MM-DALGA BANDI 5G UYGULAMALARI İÇİN İLETİ DİZİ  
ANTEN TASARIMI**

**Muhammed MALKOÇ (ORCID:0000-0002-8346-2475)**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik  
Mühendisliği

**Email:**muhammed.malkoc@bilecik.edu.tr

**Dr. Öğr. Üyesi Sibel ÜNALDI (ORCID:0000-0001-9948-4284)**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik  
Mühendisliği

**Email:**sibel.unaldi@bilecik.edu.tr

**Prof. Dr. Sibel ÇİMEN (ORCID:0000-0002-6809-1119)**

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

**Email:**sibelgunduz@kocaeli.edu.tr

**ÖZET**

İleti dizi antenler, elektromanyetik dalgaların yönünü, şeklini ve genliklerini kontrol etmek amacıyla tasarlanmış yenilikçi anten sistemleridir. Bu antenler, birden fazla elemanı bir araya getirerek yüksek yönlülük ve hedefe yönelik sinyal iletimi sağlarlar. Bu özellikleriyle ileti dizi antenler, özellikle haberleşme uyduları, radar sistemleri ve kablosuz haberleşme ağlarında önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada, mm-dalga bandında, 28 GHz frekansında çalışan düşük profilli ileti dizi anten tasarımı sunulmuştur. Önerilen yapı, katmanlar arası boşluk bulunan 4 özdeş katmandan oluşmaktadır ve bu katmanlarda dielektrik tabaka olarak Rogers RT6002 ( $\epsilon_r = 2,94$ ) kullanılmıştır. Tasarımı yapılan  $0,37\lambda_0$  uzunluğuna ve  $0,37\lambda_0$  kalınlığına sahip birim hücre, eleman boyut değiştirme yöntemi ile  $360^\circ$  iletim faz aralığı sağlamaktadır. Dört adet kare ve dört yandaki çubuklardan oluşan birim hücre geometrisi basit bir tasarıma sahiptir. Kareler ve dört yanlardaki çubuklara ait tasarım parametreleri denklemlerle birbirine bağlı şekilde ifade edilmiştir. Böylece belirli bir parametre değişimi ile metalik geometriye ait tüm boyut değiştirilmekte ve bu şekilde  $360^\circ$  iletim faz aralığı sağlanmaktadır.  $19 \times 19$  adet birim hücreden oluşan ileti dizi antenin benzetim sonuçları CST Microwave Studio ile elde edilmiştir. Bu benzetim sonuçları, tasarlanan ileti dizi antenin 28 GHz frekansında etkin alanının  $76 \text{ cm}^2$  ( $7,1\lambda_0^2$ ) ve bu frekanstaki maksimum kazancın 22,9 dB olduğunu göstermiştir. Besleme anteninin ileti dizi antene uzaklığının, dizi antenin en büyük boyutuna oranı (F/D) 0,55 olarak seçilmiştir. Tasarlanan ileti dizi anten %7,96 1-dB kazanç bant genişliğine ve %21,20 etkin alana sahiptir.

**Anahtar Kelimeler:** İleti dizi anten, 5G, Düşük profil, mm-Dalga Bandı.

**LOW PROFILE MM-WAVE TRANSMITARRAY DESIGN FOR 5G  
APPLICATIONS**

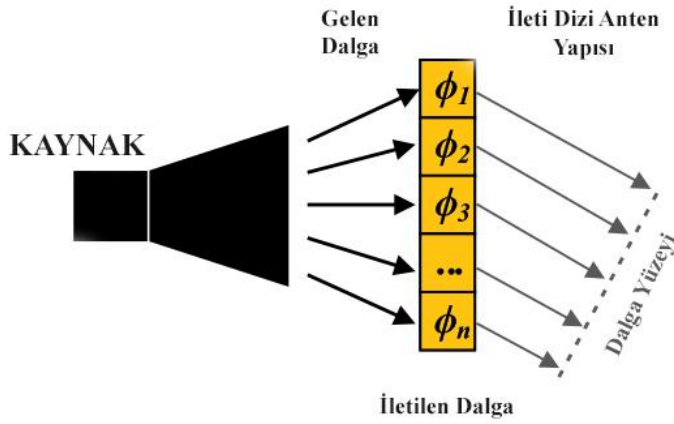
**ABSTRACT**

Transmitarray antennas are innovative antenna systems designed for controlling the direction, shape, and amplitude of electromagnetic waves. These antennas integrate multiple elements to provide high directivity and targeted signal transmission. Such capabilities make transmitarray antennas particularly beneficial for communication satellites, radar systems, and wireless communication networks. This study introduces a low-profile transmitarray antenna design operating in the mm-wave band at 28 GHz. The proposed structure consists of four identical layers with interspersed gaps, utilizing Rogers RT6002 ( $\epsilon_r=2.94$ ) as the dielectric layer. The unit cell, measuring  $0.37\lambda_0$  in length and  $0.37\lambda_0$  in thickness, achieves a 360-degree transmission phase range through an element resizing method. The geometry of the unit cell, composed of four squares and bars on each side, features a simple design. The design parameters of the squares and side bars are interconnected through equations, allowing for a comprehensive dimension change in the metallic geometry with specific parameter adjustments, thereby facilitating a 360-degree transmission phase range. Simulation results for the transmitarray antenna, composed of  $19 \times 19$  array, were obtained using CST Microwave Studio. These simulations indicate that the designed transmitarray antenna at 28 GHz has an aperture size of  $76 \text{ cm}^2$  ( $7.1\lambda_0^2$ ) and a maximum gain of 22.9 dB. The distance ratio between the feed antenna and the transmitarray antenna (F/D) was selected as 0.55. The proposed transmitarray antenna possesses a 7.96% 1-dB gain bandwidth and an aperture efficiency of 21.20%.

**Keywords:** Transmitarray, 5G, Low Profile, mm-Wave

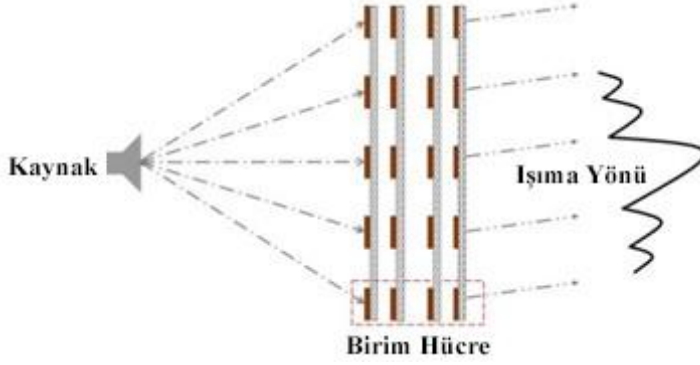
## Giriş

Uydu ve noktadan noktaya iletişimler veya radar uygulamaları gibi bir çok uygulama alanında iletilen gücü belirli bir yöne yoğunlaştırmak, alıcıya iletilen gücü iyileştirmek veya aynı frekans bandında çalışan diğer sistemlerle elektromanyetik girişimi en aza indirmek gerekebilir [1]. Bu tür durumlarda, yüksek kazanç ve yönlülük özelliklerine sahip antenlere ihtiyaç duyulmaktadır [2]. Yüksek kazançlı ışıma gerektiren kablosuz iletişim, radar ve uydu uygulamaları için ileti dizi antenler tercih edilen anten seçenekleri olarak öne çıkmaktadırlar [4]. Geleneksel yansıtıcılara ve lenslere kıyasla, ileti dizi anten ve yansıtıcı dizi antenlerin düzlemsel olarak yapılandırılabilmesi önemli bir avantaj sağlamaktadır [5].



Şekil 1. Genel ileti dizi anten modeli [3]

İleti dizi antenlerini tasarlarken, iki temel kriter faz açısı ve genliktir. Bir ileti dizi anteninin birim hücresi,  $360^\circ$  veya daha fazla bir iletim faz açısına sahip olmalıdır [6]. Bu fazı elde etmek için, çok katmanlı Frekans Seçici Yüzey tabanlı değişken boyutlu birim eleman yöntemi kullanılabilir, yansıtıcı yama eleman döndürülebilir veya her birim hücredeki faz kaymasını elektronik olarak kontrol etmek için ayarlanabilir cihazlar kullanılabilir. Analog ayar için varaktörler gibi elemanlar veya PIN diyotlar ve radyo frekansı mikroeletromekanik sistemler (RF MEMS) gibi cihazlar kullanılabilir. Çok katmanlı elemanlar için kalınlığın azaltılması basit bir teknolojidir [4]. Ancak, bu yaklaşım, elemanlardaki kaybı artırması nedeniyle daha düşük anten verimlilikleri ve daha dar bant genişliklerine yol açacaktır [7].

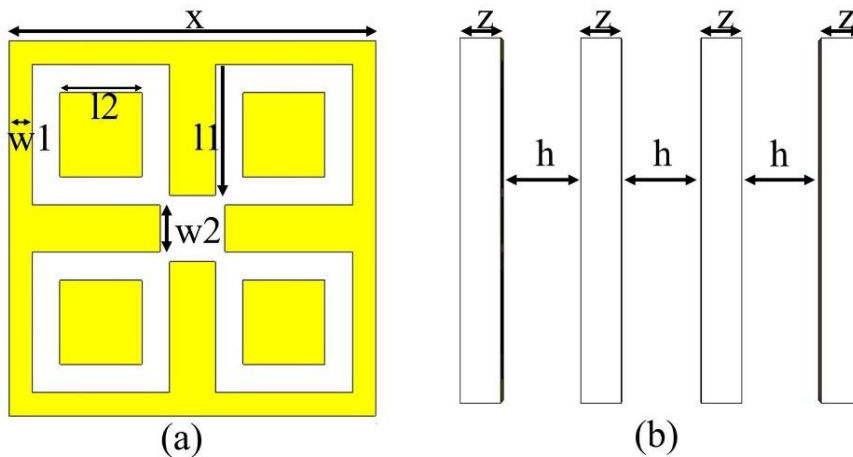


Şekil 2. M-FSY mikroşerit ileti dizi anten konfigürasyonu [8]

Nguyen ve arkadaşları, çok katmanlı Frekans Seçici Yüzeyle (M-FSY) dayalı olarak, çok geniş bir iletim bant genişliği ve geniş bir iletim faz aralığı elde etmek için polarizasyon dönüşüm tekniği kullanmıştır [9]. Araştırmada, birim hücrenin 11,8 GHz ile 13,7 GHz arasında %15,2' lik geniş bir 1-dB iletim bant genişliği sergilediği görülmüştür. Birim hücre, toplam kalınlığı yaklaşık  $\lambda/7,7$  olan düşük profilli bir tasarıma sahiptir. 21-31 GHz frekansları için tasarlanmış bir çalışmada [10], birim hücre yapısı, iki özdeş dielektrik tabaka üzerine basılmış üç metal katmandan oluşan yapı, 21 GHz ile 31,5 GHz arasında geniş bir -1dB iletim bant genişliği içinde  $45^\circ$  lik faz adımlarıyla sekiz faz durumu elde etmek için polarizasyon döndürme tekniğine dayanmaktadır. 28/38 GHz mobil uygulamalar için yapılan bir tasarımda [11], alt bant her iki faz değişim durumu için teorik minimum 0,94 dB araya girme kayıplarına sahiptir. Üst bant ise her iki faz değişim durumu için teorik minimum 0,72 dB araya girme kayıplarını sergilemektedir.

## II. İleti Dizi Anten Tasarımı

### A. Birim Hücre Tasarımı



Şekil 3. Birim Hücre Uzunlukları (a) Ön Yüz (b) Yan Görünüm

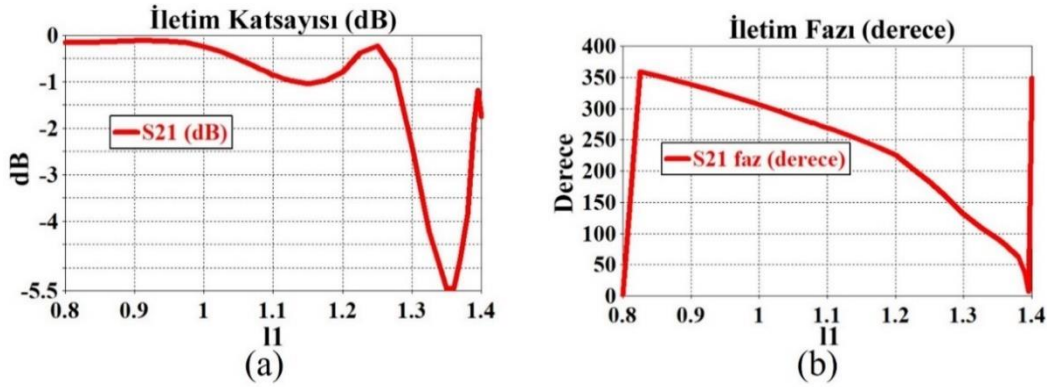
Şekil 3.a' da görüldüğü üzere, birim hücre ön yüzde bir kare halka ile dört özdeş kare ve dört yanında eşit uzunluktaki çubuklardan oluşmaktadır. Şekil 3.b'de görüldüğü gibi 4 özdeş

katmanın sadece ön yüzlerinde metal yamalar bulunmaktadır. Bu özdeş katmanlar 1 mm kalınlığında hava boşluğu ile birbirinden ayrılmıştır. Birim hücre tasarımında dielektrik tabaka olarak kalınlığı 0,508 mm olan Rogers RT6002 ( $\epsilon_r = 2,94$ ) kullanılmıştır. Birim hücrenin boyutu 4 mm ( $0,37 \lambda_0$ ) ve toplam kalınlığı ise yaklaşık  $0,37 \lambda_0$  olarak tasarlanmıştır. Sunulan birim hücreye ait tasarım parametreleri Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 7. Önerilen Birim Hücre için Tasarım Parametreleri

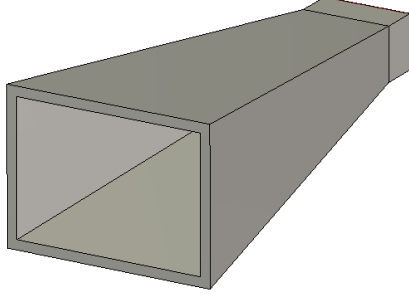
Parametre	Uzunluk (mm)	Parametre	Uzunluk(mm)	Parametre	Uzunluk (mm)
$x$	4	$l1$	0,825-1,375	$z$	0,508
$w2$ $= 2 * w1$	0,5	$l2$	$0,8 * l1$	$h$	1

Şekil 4.a’ da  $l1$  parametresinin 0.8 ile 1.4 aralığındaki değişimine göre iletim katsayısı karakteristiği görülmektedir. Şekil 4.b’ de ise yine değişken  $l1$  parameresi için iletim faz karakteristiği görülmektedir ve bu grafikte iletim fazı normalize ( $0^\circ -360^\circ$ ) haldedir. Birim hücre kullanılarak ileti dizi anten tasarımı yapılırken, dizide her bir eleman için gerekli faz değeri bu grafik yardımı ile hesaplanır sonra birim hücreler diziyeye hesaplanan fazı sağlayan boyuta göre yerleştirilir.



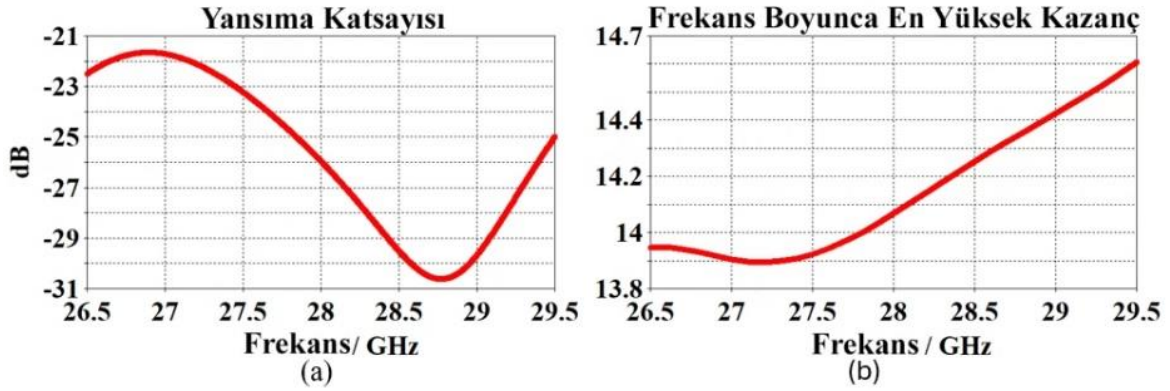
Şekil 4. İletim Katsayısı Sonuçları (a) İletim Genliği, (b) İletim Fazı

## B. Kaynak Anten Tasarımı



Şekil 5. Kaynak Anteni

İleti dizi antenin beslenmesinde kullanılacak olan huni anten (Şekil 5) CST Microwave Studio paket programı ortamında tasarlanmıştır.



Şekil 6. Besleme Anteni Benzetim Sonuçları (a) Yansımaya Katsayısı (b) Kazanç

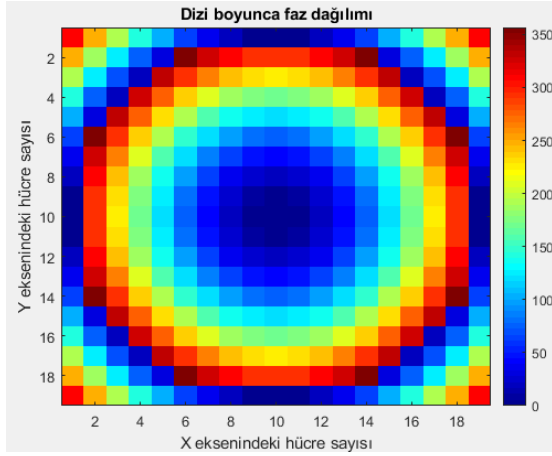
Tasarlanan horn antenin çalışma frekansı boyunca Şekil 6.a' da verilen yansımaya katsayısı grafiği ve Şekil 6.b' de verilen kazanç grafiği incelendiğinde, anten 26,5 – 29,5 GHz frekansları arasında verimli şekilde çalışmakta ve bu frekans boyunca kazancı 13,9 ile 14,7 dB arasında değer almaktadır.

### C. İleti Dizi Anten

Her bir birim hücre için kaynak antenin o hücreye olan faz gecikmesini telafi ederek belirli bir yönde hüzme odaklamak amacıyla belirli bir faz dağılımı oluştururken gerekli iletim fazı, ileti dizi antenlerde geliştirilmiş olarak şu şekilde hesaplanır:

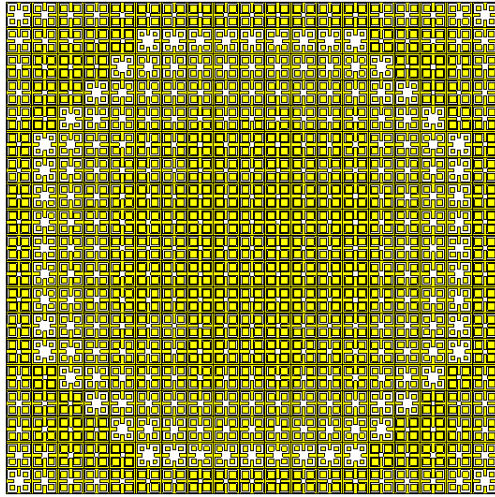
$$\psi_{ij} = k (R_{ij} - \vec{r}_{ij} \cdot \hat{r}_0) + \psi_0 \quad (1)$$

Denklem (1)' de  $\psi_{ij}$  ij'inci birim hücre için gerekli olan iletim fazını, k serbest uzaydaki yayılım sabitini,  $R_{ij}$  ij'inci elemanın besleme anteninin merkezine olan uzaklığını,  $\vec{r}_{ij}$  ij'inci eleman için pozisyon vektörünü,  $\hat{r}_0$  ana hüzme birim vektörünü ve  $\psi_0$  faz sabitini temsil etmektedir.



Şekil 7. Dizi Boyunca Faz Dağılım Grafiği

Denklem (1) kullanılarak dizi boyunca oluşan faz dağılım grafiği MATLAB programı ile elde edilmiştir. Şekil 5'te merkez 0°'den başlayarak dizi boyunca 360°'yi kapsayacak şekilde oluşan bir faz dağılımı görülmektedir. Daha sonra Şekil 4.b'deki değişken parametre – faz grafiği bilgileri ile dizi oluşturulmuştur.

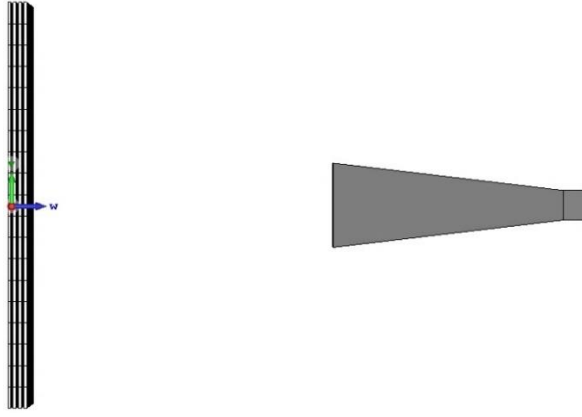


Şekil 8. Önerilen İletim Dizi Anten

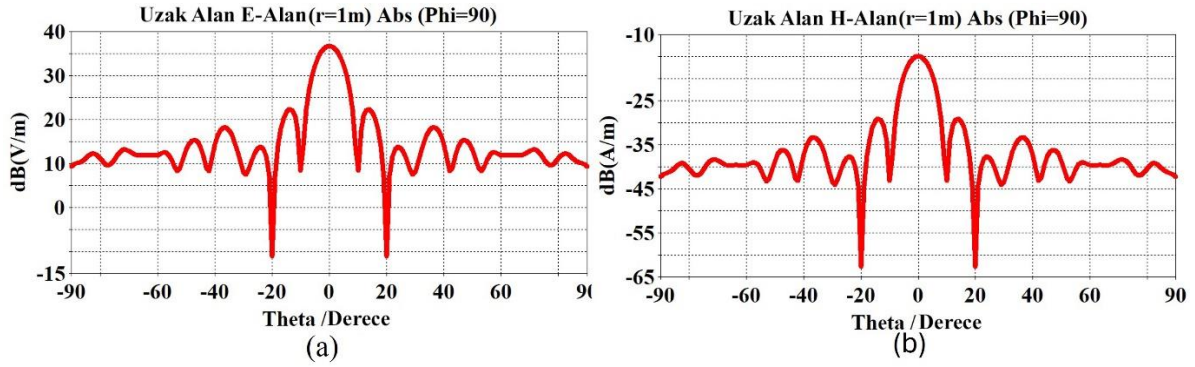
CST Microwave Studio paket programı kullanılarak oluşturulan ileti dizi anten Şekil 6'da görülmektedir. Toplamda 361 birim hücreden oluşan dizi, 360° faz değişimini kapsayacak şekilde oluşturulmuştur.

### III. İletim Dizi Anten Benzetim Sonuçları

Tasarımı yapılan ileti dizi anten ile besleme anteninin arasındaki mesafe  $F/D=0,55$  olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 9). Şekil 10 (a), antenin 28 GHz frekansındaki E- düzlemindeki ve Şekil 10 (b) antenin 28 GHz frekansındaki H-düzleminde ışınma örüntülerini göstermektedir.



Şekil 9. İleti Dizi Anten

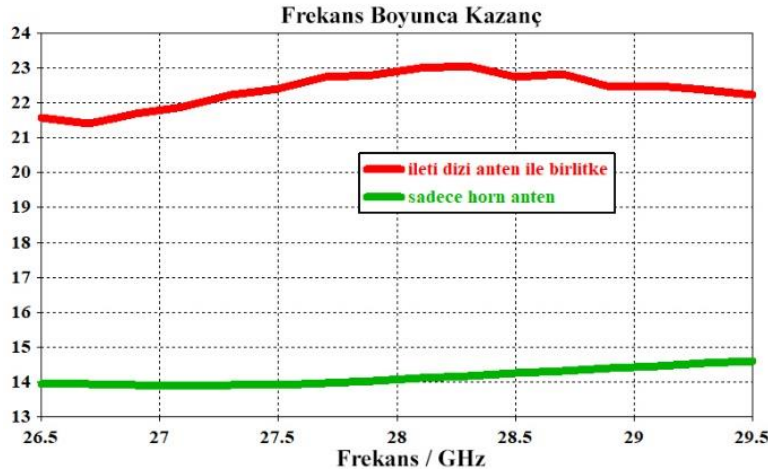


Şekil 10. İleti Dizi Antenin 28 GHz Frekansındaki Işıma Örüntüsü Benzetim Sonuçları (a) E-Alan (b) H-Alan

Şekil 11, kaynak antenin tek başına iken ve iletici dizi anten ile birlikte kazanç benzetim sonuçlarını göstermektedir. Burada görüldüğü üzere tasarlanan anten, 28 GHz frekansında 22,9 dB maksimum kazançla ulaşmıştır yani 28 GHz frekansında yaklaşık 8.5 dB kazanç artırımına denk gelmektedir. Antenin 1 dB bant genişliği %7.96 olarak elde edilmiştir. Son olarak da tasarlanan iletici dizi antenin etkin alan %21,20 olarak hesaplanmıştır. Etkin alan denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır;

$$n_{ap} = \frac{G}{D_{max}}, D_{max} = \frac{4\pi A}{\lambda_0^2} \quad (2)$$

Burada G kazanç,  $D_{max}$  maksimum yönlülük, A antenin açıklık alanı,  $\lambda_0$  serbest uzay dalga boyunu temsil etmektedir.



Şekil 11. İleti Dizi Anten Kazanç Benzetim Karşılaştırması

Tasarımı sunulan ileti dizi antene ait benzetim sonuçları literatürde var olan çalışmalar ile özellikleri bakımından Tablo II' de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Tasarlanan 4 katmandan oluşan yapı düşük profil ve etkin alan bakımından bu frekans bandındaki uygulamalar için iyi bir adaydır.

Tablo II. Performans Karşılaştırması

Referans	Katman	Frekans (GHz)	Faz Aralığı (°)	Via	Profil Büyüklüğü ( $\lambda_0 \times \lambda_0$ )	Etkin Alan (%)
[12]	4	30	360	Hayır	86.5x86.5	22.1
[13]	3	28	315	Hayır	67.2x67.2	10
[14]	3	27	1-Bit	Evet	8.6x8.6	28
Bu Çalışma	4	28	360	Hayır	7.7x7.7	21.2

#### IV. Sonuç

Bu çalışmada, 28 GHz'de çalışan 5G uygulamaları için düşük profilli ileti dizi anten tasarımı sunulmuştur. 4 katmandan oluşan birim hücre 360°'lik iletim faz aralığı sağlamıştır. Tasarımı yapılan ileti dizi anten, 7,6 cm genişliğinde ve yaklaşık 0,4 cm kalınlığındadır. Sunulan ileti dizi anten, %7,96 1-dB bant genişliğine ve %21,20 etkin alana sahiptir. Literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında önerilen ileti dizi anten düşük profil özelliğiyle ön plana çıkmaktadır.

**Kaynaklar**

- [1] Y. Shen, J. Pan, S. Xue, and S. Hu, “Wideband Folded Reflectarray With Integrated Single-Layer Differential Slot Feed,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 1, pp. 74–78, Jan. 2024, doi: 10.1109/LAWP.2023.3317397.
- [2] Y. He, J. Huang, W. Li, L. Zhang, S.-W. Wong, and Z. N. Chen, “Hybrid Method of Artificial Neural Network and Simulated Annealing Algorithm for Optimizing Wideband Patch Antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 72, no. 1, pp. 944–949, Jan. 2024, doi: 10.1109/TAP.2023.3331249.
- [3] J. R. Reis, M. Vala, and R. F. S. Caldeirinha, “Review Paper on Transmitarray Antennas,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 94171–94188, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2924293.
- [4] M. T. Nguyen, T. T. Nguyen, and B. D. Nguyen, “Wideband Transmitarray Unit-Cell Design With 1-Bit Phase Control and Twistable Polarization,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 6, pp. 627–630, Jun. 2022, doi: 10.1109/LMWC.2022.3146022.
- [5] T.-J. Li, G.-M. Wang, H.-P. Li, and H.-S. Hou, “Circularly Polarized Double-Folded Transmitarray Antenna Based on Receiver-Transmitter Metasurface,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 11, pp. 11161–11166, Nov. 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3188532.
- [6] C. Tian, Y.-Q. Lu, G. Zhao, Y.-C. Jiao, and L.-X. Guo, “Double-Layer Transmitarray Antenna Using Specially Designed Substrate,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 3, pp. 441–445, Mar. 2022, doi: 10.1109/LAWP.2021.3132680.
- [7] J. Wang, X. Zhang, J. Ding, H. Zhang, W. Chen, and C. Chen, “Characteristic Mode Inspired Broadband Circularly Polarized Folded Transmitarray Antenna,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 9, pp. 7632–7637, Sep. 2023, doi: 10.1109/TAP.2023.3284360.
- [8] T. Nguyen, B. D. Nguyen, V.-S. Tran, M. Linh, and L. H. Trinh, “Wideband Unit-cell for Linearly Polarized X-band Transmitarray Applications,” in *2018 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Oct. 2018, pp. 125–128. doi: 10.1109/ATC.2018.8587465.
- [9] M. T. Nguyen and B. D. Nguyen, “Low Thickness and Wideband Triple-Layered Transmitarray Unit-cell Design,” in *2023 IEEE Conference on Antenna Measurements*

- and Applications (CAMA), Nov. 2023, pp. 145–147. doi: 10.1109/CAMA57522.2023.10352715.
- [10] M. T. Nguyen and B. D. Nguyen, “Low Thickness Transmitarray Unit-Cell for Wideband Millimeter-wave Applications,” in 2022 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA), Dec. 2022, pp. 1–3. doi: 10.1109/CAMA56352.2022.10002596.
- [11] Q. Ali, Y. Xiao, X. Bin, and H. J. Sun, “1 BIT Dual-Band Synchronous Electronically Reconfigurable Transmit-array for Ka-band,” in 2021 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM), Nov. 2021, pp. 1–3. doi: 10.1109/iWEM53379.2021.9790402.
- [12] M. Ishfaq et al., “A Transmissive Metasurface Generating Wideband OAM Vortex Beam in the Ka-Band,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 8, pp. 2007–2011, Aug. 2023, doi: 10.1109/LAWP.2023.3271675.
- [13] H. Chang, F.-P. Lai, and Y.-S. Chen, “Transparent Transmitarray Antenna With Large Aperture for Significant Gain Enhancement in Millimeter-Wave 5G Communication Networks,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 2, pp. 663–667, Feb. 2024, doi: 10.1109/LAWP.2023.3331840.
- [14] F. Wu, J. Wang, R. Lu, X. Xia, W. Hong, and K.-M. Luk, “Wideband and Low Cross-Polarization Transmitarray Using 1 Bit Magnetoelectric Dipole Elements,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 5, pp. 2605–2614, May 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3026904.