



Uçan nesnelere THz haberleşmesi Flying things in THz communication

İsmail Ersin^{1,*}, Mustafa Akkaş², Orhan Dağdeviren³

¹ Ege Üniversitesi, Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü, 35100, İzmir Türkiye

² Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği 14030 Bolu Türkiye

³ Ege Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği, 35100, İzmir Türkiye

Öz

Çalışmamızda THz kanalı uygulamaları ve THz bandı özellikleri incelenmiştir. THz bandında havadan yere, havadan havaya iletişimde kapasiteyi etkileyen, anten gücü, mesafe, ortama bağlı emilim kaybı gibi faktörler incelenmiştir. Her maddenin moleküler yapısı farklı olduğu için madde molekül yapısına bağlı olarak belli frekanstaki elektromanyetik dalgayı (EM) rahat geçirirken bazılarının geçişine izin vermez. Maddeye özgü olarak emilimin az olduğu frekans aralığına iletim penceresi adı verilir. Çalışmamızda pratik sonuçlar veren SSRAM (Satır Satır Radyatif Aktarım Modeli)'den ortama ve frekansa bağlı emilim katsayıları elde edilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak iletim pencereleri gösterilmiştir. Madde yoğunluğunun değiştiği atmosfer katmanlarında iletim pencerelerinin de buna bağlı olarak değiştiği ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Gürültünün dar bant genişliğinde düşük olduğu ve bunun sinyal gürültü oranını (SGO) yükselttiği gösterilmiştir. THz dalgalarının emilim duyarlı olduğu gösterilmiş buna bağlı hesaplamalarla bu durum vurgulanmıştır. İçerisinde farklı oranda madde bulunan altı farklı hava modelinden elde edilen kapasiteler, kapasitenin iklimsel etkisini göstermesi açısından değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: THz bantları, THz emilim katsayısı, Sinyal Gürültü Oranı

1 Giriş

5G 2020 yılında standartlaştırıldı. 5G, iletişimde mobil geniş bandın yanı sıra ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişim sunmayı hedeflemektedir. Maksimum tepe hızı 20 Gbps ve kullanıcı deneyim hızı 0.1 Gbps'dir. Ayrıca, 500 km hareketliliği destekleyen 1 ms uçtan uca gecikme süresiyle 1 milyon cihaz/km² kadar ulaşmayı amaçlar [1]. Bugün gelinen noktada hedeflerin gerçekleşmesi için en erken sürenin 2030'dan sonrası olduğu tahmin edilmektedir. 5G iletişimde hala %100 kapsama alanına erişememiştir, bu sürücüsüz araçların iletişimi gibi yoğun bilgi akışı olan ağlarda yönetilebilirlik açısından büyük zorluktur [2]. 5G'nin bu kısıtları araştırmacıları 6G üzerine çalışmaya motive etmiştir. 5G'nin sağladığı servislerin yanı sıra %100 coğrafi kapsama alanı, cm hassaslığında coğrafi konum tespiti 6G'den beklenmektedir [3]. 6G'nin %100 kapsama

Abstract

Our study examines THz channel applications and THz band characteristics. Factors affecting capacity in air-to-ground and air-to-air communication in the THz band, such as antenna power, distance, and environment-dependent absorption loss, have been analyzed. Since the molecular structure of each material varies, some electromagnetic waves pass easily through certain substances at specific frequencies, while others are blocked. The frequency range with minimal absorption for a material is called the transmission window. In our study, absorption coefficients, dependent on the environment and frequency, were obtained using SSRAM (Step-by-Step Radiative Transfer Model). These coefficients illustrate transmission windows. Variations in transmission windows across atmospheric layers with changing material density are explained. It is shown that noise is low in narrow bandwidths, improving the signal-to-noise ratio (SNR). THz waves are sensitive to absorption, and this is emphasized through calculations. Capacities from six weather models, each containing varying material quantities, are evaluated to demonstrate the climatic effect on capacity.

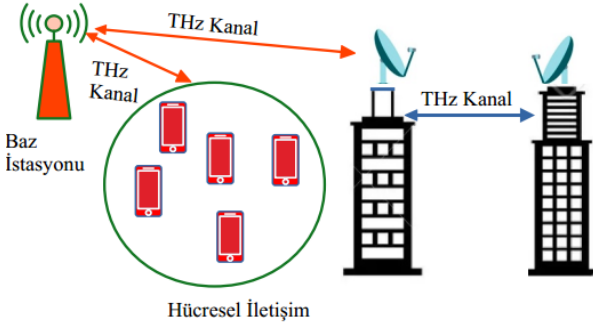
Keywords: THz bands, THz absorption coefficients, Signal-to-Noise Ratio (SNR)

alanına ulaşma ideali ancak zorlu ortamlarda insansız hava araçlarıyla THz veya optik bant kullanılarak gerçekleştirilebilir [4]. Işık tayfından yer alan THz bandı, görünür ışık ile radyo dalgaları arasında yer almasına ve bu dalgalarla benzer özellikler göstermesine rağmen kötü hava şartlarında bile ışık dalgalarına göre daha az sinyal zayıflamasına uğramaktadır. THz bandı, örneğin Şekil 1'de görüldüğü gibi iki ana iletişim omurgasını birbirine bağlayan sistemlerde, Şekil 2'de görüldüğü gibi araç ağlarında, büyük veri merkezlerinde yakın mesafelerde iletişimde, artırılmış gerçeklik [5], e-sağlık [6], dijital eş [7] gibi zaman hassasiyetli uygulamalarda veri aktarım süresini azaltarak çok geniş uygulama alanlarına sahip olacaktır [8].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ismail.ersin@yahoo.com (İ. Ersin)

Geliş / Received: 23.02.2024 Kabul / Accepted: 04.09.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1441329



Şekil 1. Ana iletişim omurgasını birbirine bağlayan sistemlerde THz bandı kullanımı



Şekil 2. Sürücüsüz araç ağı

Hüresel yeniliklerde bile LTE-A yalnızca 1 Gbps veri gönderme hızına ulaşabilmiştir [9]. Bu gibi hüresel bağlantılar THz bandı aracılığıyla oluşturulabilir ve bu linkler depremler, tsunami, sel gibi doğal felaketler nedeniyle kesintiye uğramış ağ alt yapısını Şekil 3'te görüldüğü gibi yeniden kurmak için kullanılabilir [10].



Şekil 3. Deprem sel tsunami gibi felaketler nedeniyle bozulmuş iletişim alt yapısının onarılması

Elektromanyetik iletişimde bant genişliği, dalganın frekansına ve enerjisine bağlıdır. THz bandında iletişim, 0.75-10 THz frekans aralığında gerçekleştirilir. Terahertz dalgaları dalga boyu nedeniyle madde moleküllerinde titreşime neden olmaktadır. Molekül yapısı farklı her malzeme için bu özellik parmak izi gibidir. THz dalgalarının maddenin titreşimsiz bölgelerinde geçirgenliği yüksektir, bu yüzden THz dalgaları yayıldıkları maddenin titreşimsiz

aralığına uygun frekansta yayılması gerekir [11]. Her maddeye özgü geçirgenliğin yüksek olduğu frekans aralığına iletim penceresi denir. Bu çalışmada atmosfer katmanlarında irtifaya bağlı olarak farklı iletim pencerelerinin olduğu bu iletim pencerelerinin yükseklik ve farklı hava modelleri ile nasıl değiştiği analiz edilmiştir. Elektromanyetik dalga boşlukta yol alırken moleküllerden etkilenmez ve sadece yayılım gecikmesi yaşanır. Boşlukta yol alan dalganın enerjisinin ne kadarının alıcıya ulaştırıldığı standart Friis denklemi [12] ile hesaplanır. THz dalgaları ortamda ilerlerken su ve çeşitli moleküller tarafından enerjisinin soğurulması sonucu yüksek oranda emilim kaybına uğramaktadır. Bu nedenle su ve gaz yoğunluğunun çok yüksek olduğu deniz seviyesine yakın yerlerde iletim mesafesi kısalmır. Bunu yapmış olduğumuz iletişim kanalı benzetiminde elde ettiğimiz sonuçlardan da gözlemledik. Yol arttıkça molekül etkileşmesi süreceğinden emilim kaybı da artar. Emilim kaybının ne kadar olacağı hesaplanırken emilim katsayısı kullanılır. Emilim katsayısı, bir maddenin içerisinde geçen elektromanyetik dalganın gücünün azalmasını bir ölçüsüdür. Her maddeye özgü olarak hesaplanır. Hesaplama yapılırken THz dalgasının geçtiği ortamın içinde bulundurduğu maddesel oranlara göre ışığın iletimini ve emilimini hesaplayan spektroskopik parametrelerin veri tabanı kullanılır, hava araçları gaz ortamında çalıştığı için bu çalışmada pratikle aynı sonuçları veren SSRAM [13] kullanılmıştır. Geçmişte THz bandının daha çok elektronik devrelerde devre elemanları veya veri merkezlerinde sunucular arasında iletişim sağlamak için kullanılabileceği düşünüldü. Geline nokta yapılan çalışmalarda bu düşüncenin genel olamayacağı ortamsal olarak bir ayırım yapılabileceği görülmüştür [11]. THz bandının yeryüzünden uzaya kadar olan büyük bir ölçekte kullanım olanakları olacaktır [14]. Bu çalışmada THz bandında ortam farklılıklarına göre elde edilen kapasite ve kapasiteyi etkileyen hava araçları arası mesafe, irtifa, anten gücü gibi etkenler MATLAB'da oluşturulan fiziksel kanal modeli kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın katkısı;

- SSRAM kullanılarak gerçekte aynı emilim katsayıları elde edilmiştir.
- Emilim katsayıları kullanılarak farklı yüksekliklerde farklı iletim pencerelerinin olduğu gösterilmiştir.
- Her iletişim penceresi için bant genişliği hesaplanmıştır. Belirlenen bantlar için SGO bulunmuştur.
- Hava ortamında elde edilen gerçekçi parametrelere göre, yükseklere çıkıldıkça emilimin etkisi gösterilmiştir.
- THz bandının ortamdaki en fazla etkilendiği su buharının farklı seviyelerde olduğu altı farklı hava modeli açısından elde edilen kapasiteler gösterilmiştir.

Çalışmamızın ikinci bölümünde fiziksel katman hesaplamaları, THz bandı iletim kısıtları gösterilmiştir, üçüncü bölümde MATLAB'da oluşturulan benzetim ortamında eşik emilim değerine göre oluşan iletim pencerelerinin irtifaya bağlı olarak nasıl değiştiği analiz

edilmiştir. Kapasiteyi etkileyen eşik emilim değeri ile belirlenen bant genişliği, mesafe ve irtifa konuları tartışılmıştır. Dördüncü bölümde ise çalışmamızda elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1. Fiziksel Kanal hesaplamaları

Alınan sinyal gücü **Denklem (1)**'de gösterilmiştir. **Denklem (1)**'de P_t verici anten iletim gücü, G_r ve G_t sırasıyla alıcı ve verici antenin kazançlarını belirtir. L_0 boş alan yol kaybıdır ve değeri **Denklem (2)**'de hesaplanmıştır.

$$P_r (dBm) = P_t (dBm) + G_r (dB) + G_t (dB) - L_0 (dB) \quad (1)$$

$$L_0 = 32.4 + 20 \log_{10} (d) + 20 \log_{10} (f) \quad (2)$$

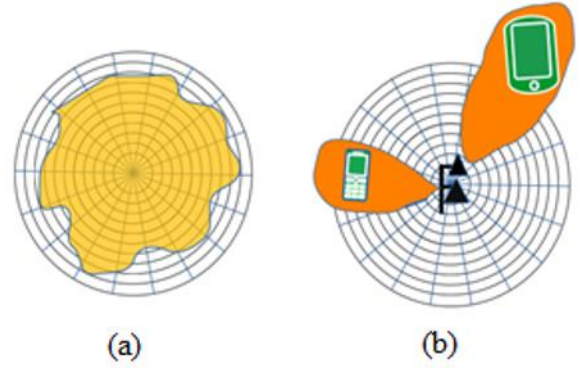
Denklem (2)'de d 'nin birimi km ve f frekans ve birimi ise MHz'dir. Friis denkleminde yol kaybına ek olarak gürültü kaybı ve ortam kaybı da eklendiğinde **Denklem (3)** elde edilir.

$$P_r (dBm) = P_t (dBm) + G_r (dB) + G_t (dB) - L_0 (dB) - L_{Gürültü} (dBm) - L_{Ortam} (dB) \quad (3)$$

$$L_{Ortam}(f, d) = k(f)_{gaz} * d * 10 * \log_{10} e (dB) \quad (4)$$

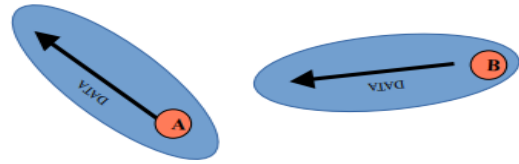
THz dalgaları enerjilerinin bir kısmı ile havadaki molekülleri titreştirir, bu olay sonucunda kaybedilen enerjiye emilim kaybı denir. Emilim kaybı SSRAM veri tabanında bulunan maddeye özgü katsayılarla **Denklem (4)** kullanılarak dB cinsinden hesaplanır.

Wi-Fi iletişimde elektromanyetik dalganın küresel bir yüzeyde yayıldığı **Şekil 4-a**'daki gibi her yöne iletim yapan anten kullanılmaktadır. **Şekil 4-b**'de gösterildiği gibi THz bandında kullanılan anten yönlüdür ve hüzme şeklinde iletişim yapılır. Antenlerin yönlü olması, anten hüzmesinin birbirine bakma zorunluluğu, iletişim kurmadan önce kanalın hazırlanması THz bandının kısıtlarındandır [15]. Hava araçlarında THz bandında iletişim kurması için kullanılan yönlü antenlerin birbirini iletişim süresince görmesi gerekmektedir. Bu yönün ve hızın hava koşullarına bağlı olduğu hava araçlarla oluşturulan ağlarda araçların komşularından sadece birini görüp diğerlerinden haberdar olmamasına sebep olmaktadır. Bu durum literatürde yönlü antenlerle iletişimde yaşanan sağırılık problemi (**Şekil 5**) olarak isimlendirilir [16]. Sağırılık problemi şu şekilde oluşur; **Şekil 5**'te gösterildiği gibi B düğümü A düğümüyle haberleşmek istiyor fakat A'nın anten hüzmesi başka bir yöne bakıyorsa; A, B için sağırır ve iletişim gerçekleşmez. Hareketliliğin olduğu ve durumun hava şartlarına göre değiştiği, hava araçlarının birbirleriyle iletişimi için uyarlamalı (adaptif) yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemde uçtan uca zaman gecikmesini azaltan, daha az mesaj çarpışması olan, verimi yüksek bir kanal için her yöne iletim sağlayan yönlü antenler kullanılmıştır [15].

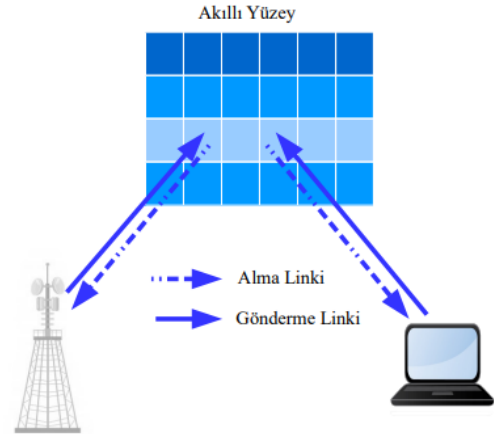


Şekil 4. Anten tipleri **şekil (a)** her yöne ileten anten **(b)** yönlü anten

Aynı şekilde [17] her yöne yönlü antenler kullanılmış gönderilecek olan pencere (frame) ve pencere alanları bunların kanalın verimine olan etkisini gösteren matematiksel çıkarımlar yapılmıştır. İlgili çalışmada iki aşamada iletişim yapılmaktadır. Aşama 1'de her yöne iletim yapan anten uyarılmakta Aşama 2'de iletişim yönlü antenle THz bandında yapılmaktadır.



Şekil 5. Anten tipleri



Şekil 6. Akıllı yüzeyler

Anten yönünün tayin edilmesi için ana kısımları **Şekil 6**'da gösterilen akıllı yüzeylerin kullanıldığı çözümler de bulunmaktadır, çalışmada [18] yönlü antenlerin birbirini görmesini sağlayacak akıllı yüzeyi kullanarak derin öğrenmeye dayalı hüzme tespiti yapılmıştır. Yönlü antenlerde iletişimde hüzme tespiti ve algoritmaları hala güncelliğini korumaktadır [19]. THz tarafında geliştirilecek

etkin algoritmalar bandın kullanımını daha da yaygınlaştıracaktır.

3. Bulgular

3.1. Emilim kaybı ve emilim katsayıları

Madde belli bir ortamdaki geçerken sahip olduğu enerjinin bir kısmını ortamdaki moleküllerin iç enerjisine dönüştürerek kaybeder. Bu kayıp EM dalganın frekansına, ortamdaki madde moleküllerinin oranına ve çeşidine bağlı olarak değişir. Bu değişim Beer Lambert yasası [20] ile açıklanır. Beer-Lambert yasası, bir maddenin içinden geçen ışığın şiddetinin, maddeye olan geçiş mesafesi ve madde içindeki moleküllerin emilim özelliği arasında logaritmik bir ilişki olduğunu belirtir. Yani, ışığın bir maddenin içinden geçerken azalma miktarı, madde içinde seyahat ettiği mesafe ve maddenin emilim katsayısı ile doğru orantılıdır. Emilim kaybı Denklem (5)'deki gibi hesaplanır. Burada I_0 ortama giren elektromanyetik dalganın başlangıçtaki şiddeti, I ortamdaki ayrılan EM dalganın şiddeti olmak üzere, $k(f)$ ortamdaki her bir madde için hesaplanan ortama özgü emilim katsayısı, d EM dalganın maddenin içinden geçtiği yolun uzunluğudur. Ortamda bulunan moleküllerin cinsine ve oranına bağlı olarak genel bir $k(f)$ değeri ise Denklem (6)'daki gibi hesaplanır.

$$I = I_0 \times e^{-k(f) \cdot d} \quad (5)$$

$$k(f) = \sum_i k_i(f) \quad (6)$$

Madde moleküllerinin atomsal ve oransal dağılımına bağlı olarak oluşturulan atmosfer modellerinden elde edilen katsayılarla hangi frekansta EM dalganın gücünden ne kadar emilim olacağı hesaplanır. Madde molekülleri açısından her molekülün az ya da çok bir emilim etkisi olduğu bu modellerden elde edilen bilgiler ışığında değerlendirildiğinde THz bandı için su buharının ölümcül bir etkisi olduğu gösterilmiştir [21]. Bu kayıp atmosfer katmanlarındaki su buharı miktarı, sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişkenlik gösterir. Belli bir yükseklikteki su buharı yoğunluğu Denklem (7)'de gösterildiği gibi hesaplanır h_0 ölçek yüksekliği denir ve su buharının hangi aralıklarda değiştiğini ifade eder ölçek yüksekliği standart olarak 2 km olarak alınır. ρ_0 değeri standart zemin seviyesi su buharı yoğunluğunu göstermek üzere, $p(h)$ h yüksekliğindeki su buharı miktarını g/m^3 cinsinden vermektedir. Denklem (8)'de su buharı yoğunluğuna bağlı olarak belli bir yükseklikte hesaplanan basıncı ifade etmektedir.

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-h / h_0) \text{ g/m}^3 \quad (7)$$

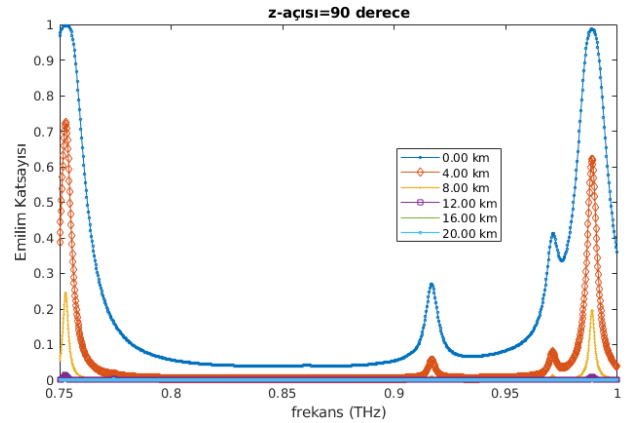
$$e(h) = \rho(h) * T(h) / 216.7 \text{ hPa} \quad (8)$$

Denklem (7) ve (8)'den yararlanarak yükseklikle birlikte su buharı yoğunluğunun azaldığı sonucunu çıkarabiliriz. Fakat bu yoğunluk belli bir yüksekliğe kadar azalmakta belli bir yükseklikten sonra değişmemektedir [15]. Denklem (9)'da belirli bir yüksekliğe ulaşıldığında, $e(h)/P(h) = 2 \times 10^{-6}$ olacak şekilde su buharı oranının bir dengede kaldığı ifade ediliyor. Bu değer, belirli bir yükseklikteki su buharının

basınç içindeki oranını ifade ediyor. Belirli bir noktada bu oranın sabitlendiği ve yükseklerde bu oranın değişmediği görülmektedir.

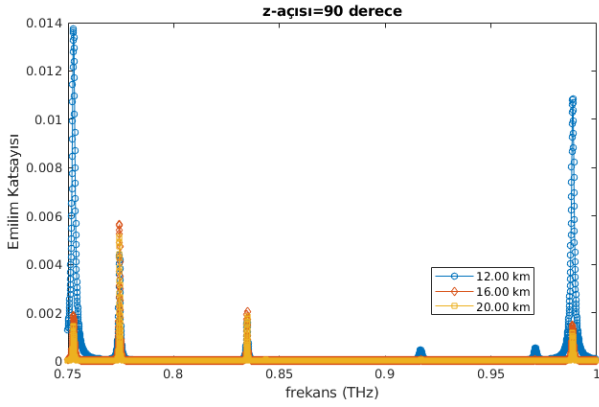
$$e(h)/P(h) = 2 \times 10^{-6} \quad (9)$$

Şekil 7'de 0, 4, 8, 12, 16, 20. km irtifalarda ayrı ayrı hesaplanmış frekansa bağlı emilim katsayıları ($k(f)_{\text{gaz}}$) gösterilmiştir. Yükseklik arttıkça emilim katsayısı değerlerinin azaldığını görmekteyiz. Madde bazı frekanslarda titreşirken bazı frekanslarda da titreşmez. Şekil 7'de görüldüğü gibi deniz seviyesinde hava içinde bulunan madde moleküllerin bulunduğu orana bağlı olarak bazı frekanslarda emilim daha çok gerçekleşir bazılarında ise emilim çok az gerçekleşir. Emilimin daha az gerçekleştiği bu frekans aralığına iletim penceresi denir [22]. İletim penceresi yükseklerle çıkıldıkça titreşen madde miktarının azalması nedeniyle genişler. Şekil 7 takip edildiğinde 0. km yükseklikte deniz seviyesinde emilim katsayısının 4. ve 8. km'lerdeki emilim katsayısından daha yüksek hesaplanması, su buharı yoğunluğunun deniz seviyesinde en yüksek düzeyde olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 7. 0, 4, 8, 12, 16, 20 km irtifada frekansa bağlı emilim katsayıları

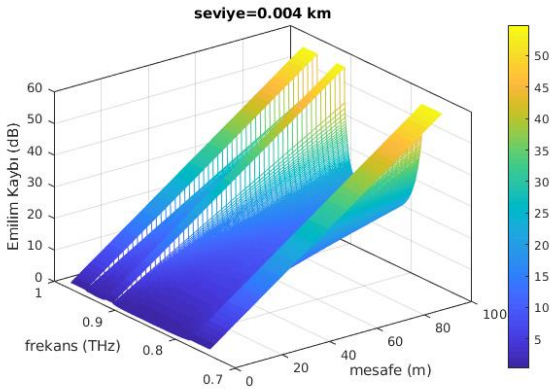
Yükseklere çıkıldıkça su buharının etkisinin azalması sonucu 0, 4 ve 8. km'lerde emilim katsayıları belirgin farklılıklar gösterirken 8 km'den sonra su buharının sabitlenmesi sonucu farklılıklar azalmış emilim katsayıları 0'a yaklaşmıştır. Daha çok ayrıntı göstermesi açısından Şekil 8'de 12 ile 20 km arası irtifalarda hesaplanan emilim katsayıları gösterilmiştir. Şekil 8 analiz edildiğinde emilim katsayılarının 0.014 mertebesinde ihmal edilebilir bir değerde olduğu görülmektedir. Şekil 7'ye bakıldığında deniz seviyesinde iletim penceresinin 0.85-0.89 THz aralığında olduğu, Şekil 8'de ise 8 km den sonra iletim penceresinin 0.75-0.98 THz aralığına genişlediğini gösterilmiştir. Şekil 7 ve 8 birlikte analiz edildiğinde yükseklikle birlikte emilimin etkisi azalır.



Şekil 8. 12, 16, 20 km irtifalarda emilim katsayıları

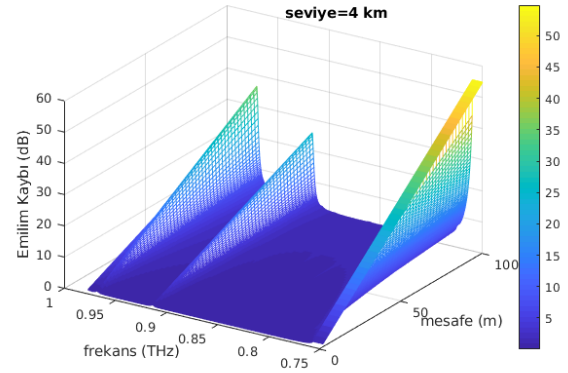
3.1.1 Emilim kaybı hesaplanması

Denklem (4) ve SSRAM'den elde edilen katsayılar kullanılarak deniz seviyesinden başlayarak 0, 4 ve 8. kilometre irtifadaki hava araçları arasındaki mesafenin 0 ile 100 metre aralığında ölçülen değerlerinde emilim kayıpları, dB cinsinden Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir. Şekil 9'da, hava araçları 4 metre irtifada iken ölçülen emilim kaybı değerleri dB cinsinden sunulmuştur. Hava araçları deniz seviyesinden 4 metre yükseklikteyken aralarındaki mesafe 100 metre olduğunda ölçülen emilim kaybı ortalama 30 dB civarındadır. Şekil 10'da ise hava araçlarının 4 km irtifada olduğu durumda elde edilen emilim kayıpları gösterilmektedir.

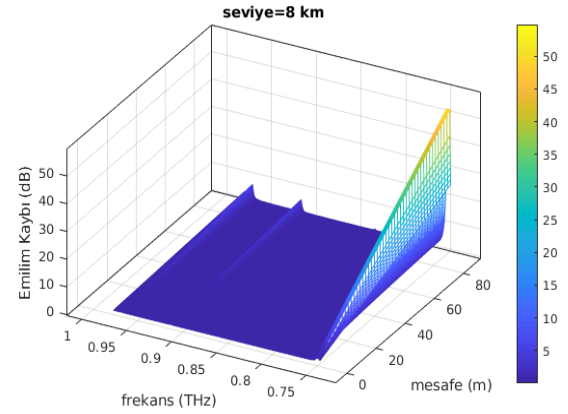


Şekil 9. 4 m de farklı mesafeler için hesaplanan emilim kaybı

Grafiğe baktığımızda araçlar arası mesafenin 100 m olduğu durumda emilim kaybının ortalama 15 dB olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, Şekil 11'de hava araçlarının 8 kilometre irtifada olduğu durumda mesafeye bağlı hesaplanan emilim kaybı değerleri sunulmuştur. Burada emilim kaybının ortalama olarak hava araçları arası mesafenin 100 m olduğu durumda 5 dB civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 10. 4 km irtifada farklı mesafeler için hesaplanan emilim kaybı



Şekil 11. 8 km irtifada farklı mesafeler için hesaplanan emilim kaybı

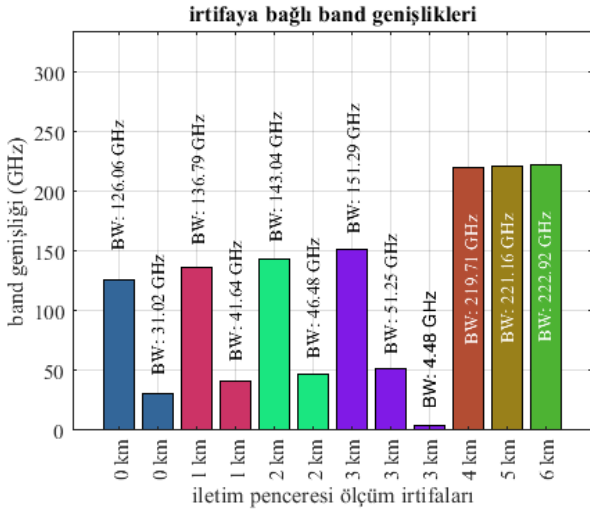
3.1.2 Emilim kaybı mesafe ilişkisi

Emilim kaybının hesaplanmasında kullanılan Denklem (4) incelendiğinde mesafe etkisinin doğrusal olduğu görülür. Hava araçları arasındaki mesafe arttıkça elektromanyetik dalganın madde molekülleri ile etkileşim süresi artacak bu da emilim kaybını artıracaktır. Bu sebeple irtifanın 4 m olduğu durumda elde edilen değerlerin bulunduğu Şekil 9'a bakıldığında 0.78-0.89 THz iletim penceresinde 1 m'den 100 m'ye kadar olan hava aracı mesafesinde emilim kaybının 1 dB'den 25 dB'ye kadar değiştiği görülmektedir. İrtifanın 4 km olduğu durumda aynı iletim penceresi için aynı mesafe aralığında emilim kaybı 1 ile 15 dB arasında hesaplanmıştır. Öte yandan irtifanın 8 km olduğu durumda ise hesaplanan emilim kaybının 1 ile 5 dB aralığında olduğu görülmektedir. Mesafe arttıkça Şekil 9, 10, 11'de emilim kaybının katsayı ölçüsünde arttığını gözlemlemekteyiz. İrtifa ile birlikte emilim katsayılarında bir azalma görülmüştür. Emilim katsayısındaki azalmadan dolayı da aynı mesafede irtifa arttıkça emilim kayıpları azalmıştır.

3.2. Bant Genişliği

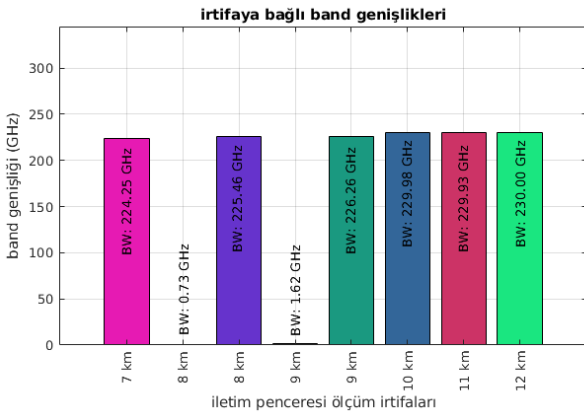
Taşıyıcı frekans ve bant genişliği arasındaki ilişki, iletişim sistemlerindeki veri iletimi ve kapasiteyi belirleyen önemli bir faktördür. Taşıyıcı frekans, belirli bir frekans

temsil ederken, bant genişliği bu taşıyıcı frekansın üzerinde ve altında iletilen verinin genişliğini ifade eder. Bu ilişki, iletişim sistemlerinin tasarımı ve performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Çalışmamızda 0.75-0.98 THz frekans aralığında deniz seviyesinden 6 km irtifaya kadar elde edilen emilim katsayısının 0.10 eşik değeri seçilmesi ile bulunan iletim pencereleri ve bu pencerelerin bant genişliği hesaplanmıştır. İrtifa arttıkça atmosferde madde oranlarının değiştiği ve bu moleküllerin farklı frekans emilim hassasiyetlerine göre farklı iletim pencereleri oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan bu iletim pencereleri seçilerek elde edilen bantlar bulunmuştur.



Şekil 12. İrtifaya bağlı bant genişlikleri 0-6 km

Oluşan iletim pencerelerinin 0-7 km arasında dar olduğu, 7 km den sonra ise genişlediği Şekil 12 ve 13 incelendiğinde görülecektir.



Şekil 13. İrtifaya bağlı bant genişlikleri 7-12 km

Şekiller incelendiğinde bant genişliğinin yükseklere çıktıkça artacağını bu da Denklem 12’de görüldüğü gibi kapasite artışını sağlayacağı görülmektedir. Şekil 12’de deniz seviyesinde elde edilen 126.06 GHz ve 31.03 GHz bantların irtifanın 4 km olduğu durumda ise 219.71 GHz’ye genişlediği görülmektedir. Şekil 13’de İrtifa 13 km

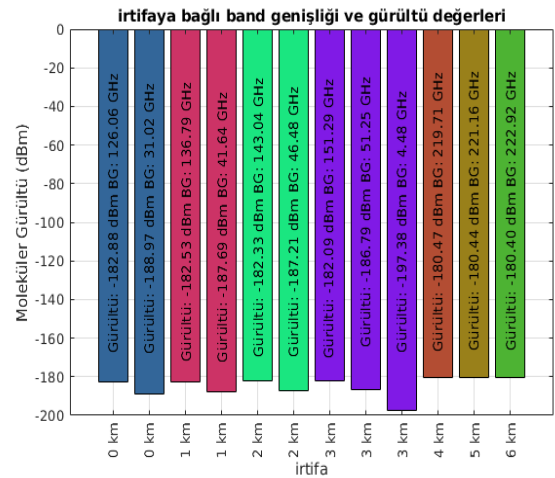
olduğunda 0.10 eşik değerinin altında kalan frekanslarla oluşan bantın genişliğinin ve değerinin 230 GHz olduğu hesaplanmıştır. Çalışmanın diğer bölümlerinde kapasite ve ilişkili parametreler tartışılmıştır.

3.3. Gürültü

Elektromanyetik dalganın ilerlediği ortamdaki madde molekülleri ile etkileşmesi sonucu enerjisinin bir kısmı ısı enerjisine dönüşür. Buna termal gürültü denir. Gürültü kaybı Denklem (10) kullanılarak hesaplanır.

$$L_{Gürültü} = 10 \log_{10} (1000 * k * T * B) \text{ (dBm)} \quad (10)$$

B Hz cinsinden frekans bant genişliği, T sıcaklık birimi Kelvin, k ise Boltzmann sabiti ve değeri yaklaşık olarak 1.3801×10^{-23} J/K eşittir. Denklem (10)’da bant genişliğinin gürültü kaybı üzerindeki doğrusal bir etkisi olduğunu görmekteyiz. Yükseklere çıkıldıkça bant genişliğinin seçilen emilim katsayısı eşik değerine bağlı olarak artacağını elde ettiğimiz emilim katsayılarına bağlı olarak gözlemlenmiştir. Bu bölümde yapılan hesaplamalar Şekil 12 ve 13’teki bant genişlikleri kullanılarak yapılmıştır. Şekil 12’de ilk barda gösterilen deniz seviyesinde hesaplanan banda ait olan Şekil 14’de ilk barda gösterilen gürültü değeri -182.88 dBm hesaplanırken, bant genişliğinin 224.25 GHz olduğu 7 km irtifada gürültü -180.38 dBm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 14. İrtifaya bağlı elde edilen gürültü 0-6 km

Şekil 15 incelendiğinde bant genişliğinin yüksek olduğu 7-12 km irtifalarda gürültünün de arttığı hesaplanmıştır.

Sınırlı bant genişliği, iletilen sinyalde daha az gürültü taşıma eğilimindedir. Şekil 13’te 9. km irtifada ilk dar bant olan 1.62 GHz bandında gürültünün miktarını Şekil 15’de incelediğimizde daha az hesaplandığını gözlemleyebiliriz. Band genişliğinin düşük olduğu bu durum yüksek sinyal-gürültü oranıyla sonuçlanır, ancak ilerleyen bölümlerde yüksek SGO oranının her zaman yüksek kapasite ile sonuçlanmadığı analiz edilmiştir.

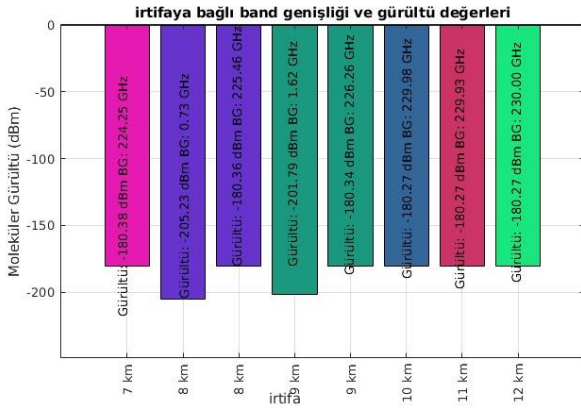
3.4. Sinyal gürültü oranı

Sinyal ortamda ilerlerken iletim gücünün bir kısmını emilme ile yitirir kalan kısmın gürültüden ne kadar büyük olduğu sinyal gürültü oranı ile ifade edilir. Sinyal gürültü oranı sinyalin kalitesi olarak düşünülür. **Denklem (11)**'de SGO değerinin dB cinsinden hesaplanması gösterilmektedir.

$$SGO[dB] = P_{\text{gönderilen}}[dB] - P_{\text{Kaybedilen}}[dB] - \text{Gürültü}[dB] \quad (11)$$

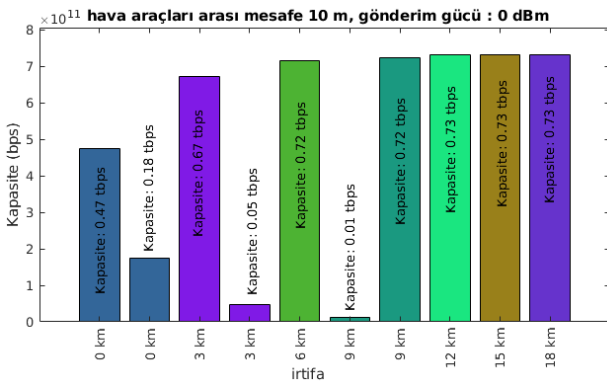
3.4.1. SGO güç ilişkisi

Denklem (11)'de görülen SGO ve güç ilişkisi dB cinsinden gösterilmiştir. **Denklem (11)**'de parametreler incelendiğinde SGO değerinin anten gönderim gücüne bağlı olarak artacağı görülmektedir. Çalışmamızın bu bölümünde SGO hesaplaması yapılırken gönderilen gücün tüm bant frekanslarının alt bant olarak düşünüldüğü her bir bant için ayrı SNR hesaplamasının yapıldığı yöntem yerine; iletim penceresinin tüm bant genişliğini tek bir bant olarak alan bantın ortasındaki frekansı taşıyıcı frekans olarak seçen yöntem benimsenmiştir.



Şekil 15. İrtifaya bağlı elde edilen gürültü 7-12 km

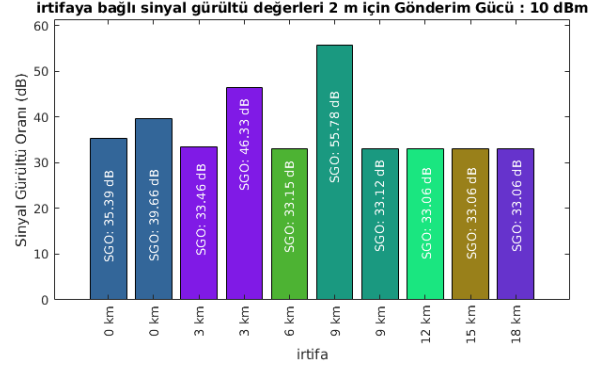
3.4.2. SGO bant genişliği ilişkisi



Şekil 17. 0 dBm anten gücünde 10 m mesafede elde edilen kapasite değerleri

Şekil 16'da 9. km de 1.62 GHz bandında gürültü bant genişliğinden dolayı düşük çıkmıştır. Bu açıdan aynı bantta

elde ettiğimiz SGO değeri de düşük çıkan gürültü değerinden dolayı sinyal büyüklüğünün bir ölçüsü olarak büyük hesaplanmıştır. Bu ilişki bant genişliği, SGO grafiğinde gösterilmiştir.



Şekil 16. 0-18 km irtifalar için hesaplanan SGO değerleri

Buna göre düşük bant genişliği olan bölümlerde yüksek SGO değeri elde edilmiştir. Şekil 16 incelendiğinde 0. km de deniz seviyesinde 2. bantta gürültü daha düşük çıktığı için deniz seviyesinde 2. bantta SGO değeri daha yüksek çıkmıştır. Bu açıdan dar bantın gürültü değeri düşük olmasından dolayı SGO değeri büyük çıkmaktadır. Dar bantın kapasite üzerindeki etkisi kapasite hesaplamasında değerlendirilmiştir.

3.5. Kapasite

Çalışmamızın bu bölümünde THz bandı için kapasite hesabı tartışılmıştır. İlk yaklaşım klasik Shannon Teoremi ile yapılan hesaplamadır. Bu hesaplamada bant genişliğinin düşük ve yüksek frekansı arasında kalan orta frekans taşıyıcı frekans olarak seçilir, iki frekans farkı bant genişliği (B), olarak belirlenir ve kapasite **Denklem (12)**'deki gibi hesaplanır [23].

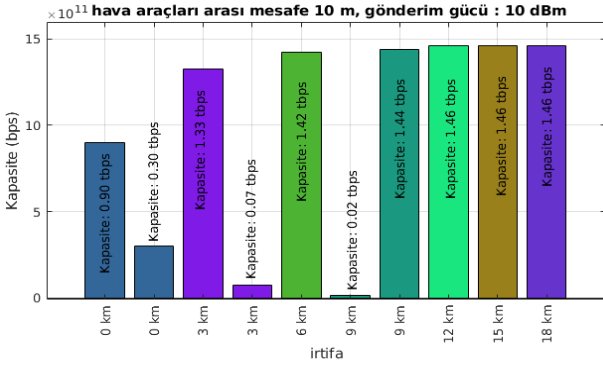
$$C = B \cdot \log_2(1 + SGO) \quad (12)$$

Tüm kayıp hesaplamaları ve kanal modellemesi sadece taşıyıcı frekans kullanılarak hesaplanır. Buradaki dezavantaj ise bant içindeki frekansların göz ardı edilmesidir.

Her frekansın bağımsız olarak taşıyıcı frekans olarak seçildiği birbiri ardına gelen frekansların oluşturduğu her alt bantın bağımsız olarak kapasitelerinin hesaplandığı ve bulunan kapasitelerin **Denklem (13)**'deki gibi ana bant için toplanması ile hesaplanır [24].

$$C(d) = \sum_i \Delta f_i \log_2(1 + SGO_i) \quad (13)$$

Kapasite hesabı yaparken seçilen iletim penceresinin bant genişliğine ve bant genişliğinin gürültüye olan etkisi Şekil 17 ve 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. 10 dBm anten gücünde 10 m mesafede elde edilen kapasite değerleri

Alıcıya ulaşan kayıplı sinyalin gücünün dar bantta düşük çıkan gürültü değerine oranı dar bantta SGO değerinin yüksek çıktığı şeklinde yorumlanmıştır. Şekil 14'te 9 km irtifaya ait 0.10 iletim katsayısının altında kalan iletim katsayıları ile oluşan 2 iletim penceresinden 1.62 GHz bant genişliğine sahip olan bantta hesaplanan gürültü değerleri görülmektedir. Aynı şekilde sinyal gücünün bu gürültü gücüne oranına bakıldığında SGO değerinin yüksek çıktığı Şekil 16'da görülmektedir. Shannon Kapasite formülüne (Denklem (12)) bakıldığında yüksek SGO değerinin yüksek kapasite olmadığı bunun yanında bant genişliğinin büyük olması gerektiği görülebilir. Gönderim gücünün 10 dBm, hava araçları arasındaki mesafenin 10 m olduğu durumlarda çeşitli irtifalarda hesaplanan kapasite değerleri Şekil 18'de görülmektedir. Burada yukarıdaki sözü edilen 9 km irtifada hesaplanan 1.62 GHz'lik bant takip edildiğinde kapasitenin düşük kaldığı görülmüştür. Özetle kapasitenin çok büyük SGO'ya Şekil 16'da gösterilen bantlarda görülen değerlere bağlı olarak yüksek çıkacağı öngörülse de 9. km'deki irtifada hesaplanan 55.78 dB ile SGO'nun en yüksek hesaplandığı ilk barda elde edilen kapasitenin 0.02 tbps olduğu Şekil 17'de görülmektedir. Bu sonuç bize yüksek SGO değeri ile ona eşlik eden geniş bant olmayınca yüksek kapasite elde edilemeyeceğini gösterir. Yükseklerle çıkıldıkça su buharı emiliminin azalması ile iletim penceresinin genişlemesi sonucu artan bant genişliği sebebiyle kapasitenin 1.40 tbps'nin üstünde hesaplanmıştır. 6 km irtifadan sonra madde oranının sabit kalması sebebiyle hesaplanan kapasitelerin değişmediği Şekil 17'de görülmektedir.

3.5.1. Kapasite güç ilişkisi

Bu kısma kadar ele aldığımız konulardan anten gönderim gücü arttıkça alınan sinyal gücünün arttığı ve bunun sonucu olarak SGO'nun artacağı bunun da geniş bantlarda kapasiteyi artıracak çıkarımında bulunabiliriz. 0 dBm ve 10 dBm anten verici gücü kullanılarak çeşitli irtifalarda 0.10 eşik emilim değerleri ile oluşan bantlarda aralarında 10 m mesafe bulunan hava araçlarının elde ettikleri kapasite Şekil 17 ve 18'de görülmektedir. Şekillere bakıldığında anten gönderim gücünün 0 dBm olduğu durumda 0. km deniz seviyesinde aralarında 10 m mesafe olan iki hava aracı arasındaki mesafede elde edilen kapasitenin 0.47 tbps olduğu, aynı araçların 10 dBm güç kullanılarak kurdukları iletişimde kapasitenin 0.90 tbps

olduğu görülmüştür. Bu açıdan Şekil 17 ve 18 incelendiğinde anten gücü arttıkça kapasitenin de arttığını gözlemlemekteyiz. Buna göre kapasite ile anten gücü arasında doğrusal ilişki olduğu görülmektedir.

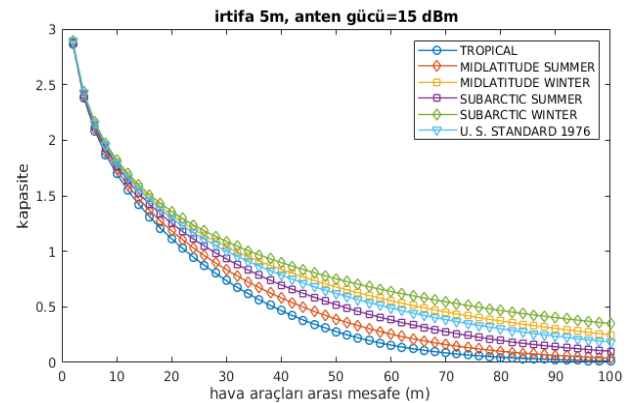
3.5.2. Kapasite hava modelleri ilişkisi

Farklı hava modelleri içerisinde farklı maddeler olmasından dolayı farklı geçirgenliklere sahip olmaktadır. SSRAM'de modellenmiş ve içeriği Tablo 1'de gösterilen altı farklı hava modeli bulunmaktadır. SSRAM'de bulunan hava modelleri farklı madde oranlarına sahiptir. Bu madde oranlarının THz dalgaları üzerindeki etkisini görmek amacıyla her bir hava modeli için kapasite hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda elde edilen kapasite, hava modeli arasındaki ilişki Şekil 19'da görülmektedir.

Tablo 1 SSRAM hava modelleri ve madde içerikleri [25]

Hava Modelleri	Maddeler			
	Su	Karbondioksit	Oksijen	Azot
Tropikal	11.02	0.14	88.84	-
Orta Enlem Yazı	8.22	0.14	91.63	-
Orta Enlem Kışı	2.02	0.15	97.82	-
Subarktik yaz	5.40	0.15	94.45	-
Subarktik Kış	0.67	0.16	99.18	-
U.S. Standart, 1976	0.78	0.03	20.94	78.25

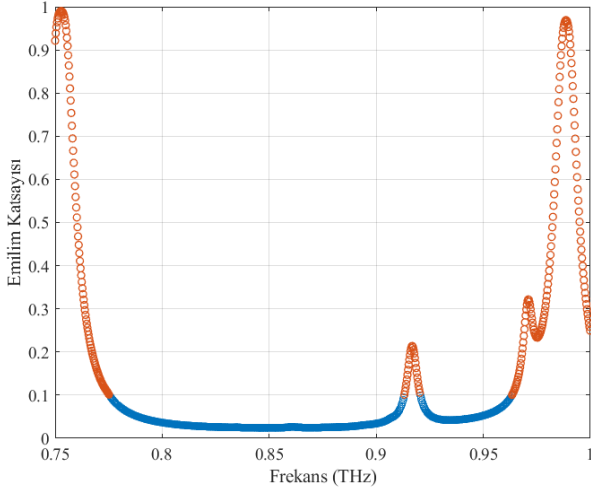
Şekil 19'da elde edilen değerler 5 m irtifada bulunan, aralarındaki mesafenin 100 m'ye kadar çıktığı hava araçları için hesaplanan iletişim kapasitesi görülmektedir. Buna göre hava araçları arasındaki mesafe arttıkça tüm hava modellerinde emilim ölçüsünde kapasite düşüşü görülmüştür. Tabloya bakıldığında farklı hava modellerinin içerisinde bulunan su buharı, oksijen, karbondioksit ve azot değerlerinin farklı olduğunu görmekteyiz. Şekil 19'a bakıldığında en düşük kapasite, su buharının en yoğun olduğu tropikal modelde hesaplanmıştır. Su buharı etkisinin en az olduğu U.S. Standart 1976 modelinde kapasitenin daha yüksek çıkması beklenirken azot ve oksijen etkisiyle kapasitenin Orta Enlem Yazı'ndan daha az çıktığı görülmüştür.



Şekil 19. Hava modeli kapasite, mesafe ilişkisi

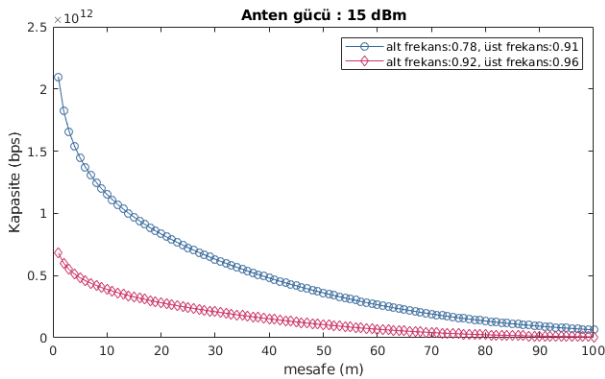
3.5.3. Kapasite iletim penceresi ilişkisi

Çalışmamızın bu bölümüne kadar yapılan hesaplamalarda eşik emilim katsayısı değerinin altında kalan değerlerle oluşan iletim penceresinin bant genişliği kullanılmıştır. Çalışmamızın bu bölümünde ise eşik değerin üstünde alınan değerlerle elde edilmiş iletim pencerelerinin bant genişlikleri ve hesaplanan kapasiteler tartışılacaktır. **Şekil 20** incelendiğinde 0.10 eşik değerinin altında mavi renkli iki adet iletim penceresinin olduğu görülmektedir.

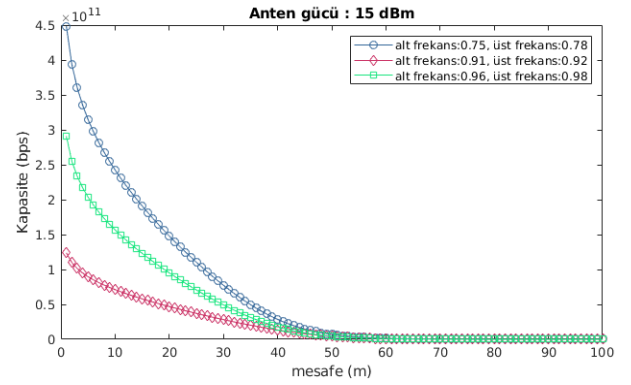


Şekil 20. Eşik emilim katsayısı(0.10) ile belirlenen iletim penceresi(mavi)

Bu iletim pencerelerinin bant genişliği olarak, birisi dar (0.92-0.96 THz) bant, diğeri ise geniş banttır (0.78-0.91 Thz). Eşik değerinin üstünde yer alan ve emilimin yüksek olduğu frekanslarda hesaplanan iletim pencereleri de bordo ile gösterilmiştir. Eşik emilim değerlerinin altındaki frekans bölgeleri iletim penceresi olarak seçildiğinde hava araçları arasındaki mesafeye bağlı olarak hesaplanan kapasitelerin **Şekil 21**'de görülmektedir. Burada aralarında 10 m mesafe bulunan iki hava aracının aralarındaki iletim kapasitesi dar bant için 0.35 tbps iken geniş bantta iletim 1.35 tbps seviyesindedir. Eşik değerinin üstünde yer alan frekans değerleri için elde edilen bantlar ile hesaplanan kapasiteler **Şekil 22**'de görülmektedir.



Şekil 21. Eşik emilim katsayısı (0.10) altındaki iletim penceresi (mavi) bant kapasite mesafe ilişkisi



Şekil 22. Eşik emilim katsayısı(0.10) üstünde bant kapasite mesafe ilişkisi

Buna göre eşik değeri 0.10 nun üstünde olduğu için emilim daha da artmıştır. Emilimin çok olması sebebiyle aralarında 10 m mesafe bulunan iki hava aracı arasındaki kapasite maksimum 0.45 tbps elde edilmiştir. **Şekil 22**'de görüldüğü gibi tüm bantlarda hava araçları arasında 40 m mesafe bulunduğu durumda iletişimin koptuğu, **Şekil 21**'de ise iletişim mesafesinin aynı şartlarda 70 m mesafeden sonra koptuğunu görmekteyiz. Bu da bize THz gibi ortam hassasiyeti yüksek EM dalgalarla kurulan iletişimde iletim penceresi ve bu pencerenin genişliğini belirleyen emilim katsayısı parametrelerini göz önüne almayı gerektirir.

4. Sonuç

İletişimde ortam hassasiyeti yüksek THz bandını kullanan hava araçlarının arasında kurulan bağlantının kapasitesinin anten gönderim gücü, iletim katsayısı ve onu etkileyen irtifa, hava modellerine bağlı olarak nasıl değiştiği açıklanmıştır. Her ortamda her frekansta iletişim gerçekleşmez, bazı frekanslar bazı madde moleküllerinin titreşmesine sebep olurken bazı frekanslarda ise bu olay gerçekleşmez. İrtifa arttıkça THz dalgalarının etkileştiği maddesel yoğunluğun azalması sebebiyle iletim pencerelerinin genişlediği gösterilmiştir. THz iletişimde kapasitenin hesaplama şekilleri tartışılmıştır. Hava araçlarının buldukları hava modellerine bağlı olarak elde edilen kapasiteler, içerisinde su buharı bulunan maddesel ortamda diğer ortamlara göre su buharının emilimi sebebiyle düşük çıkmıştır. Ayrıca bu çalışmada 0.75-1 THz aralığında 0.10 eşik değerinin altında (**Şekil 20**, mavi renkli) ve üstünde kalan (**Şekil 20**, bordo renkli) frekanslarda belirlenen iletim penceresini kullanan bantlarda elde edilen kapasiteler de tartışılmıştır. İletim katsayılarının yüksek olduğu iletim pencerelerinde elde edilen kapasitenin yüksek, emilim kaybından dolayı düşük çıktığı görülmüştür. Bu sebeple THz bandında iletişim kuran hava araçlarının modellenmesinde emilim katsayılarının, ortam türünün, hava aracı irtifasının göz önünde bulundurulması gereken önemli bir metrik olduğunu anlaşılmıştır. Bu çalışmada elde edilen bulgular, THz iletişim sistemlerinin tasarımında ortamın etkilerinin göz ardı edilemeyeceğini göstermiştir. Farklı maddelerin THz dalgalarını farklı frekanslarda emme özellikleri, iletişim kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, çeşitli malzemelerin THz emilim özelliklerinin deneysel olarak

belirlenmesi ve bu verilerin yapay zeka algoritmaları ile modellenmesi, THz iletişim sistemlerinin daha doğru ve verimli bir şekilde tasarlanmasına olanak sağlayacaktır. Doğru bant ve frekans seçimi, anten gücü ve atmosferik koşulların titizlikle değerlendirilmesiyle, THz bandı, sanal ve artırılmış gerçeklik uygulamaları gibi alanlarda yüksek kaliteli, gerçek zamanlı ve etkileşimli deneyimler sunabilecek dokunsal internetin temelini oluşturacaktır. Bu çalışmamız, bu açıdan dokunsal internetin geleceği için önemli bir adım olup, bu alandaki araştırmalara öncülük edecektir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %19

Kaynaklar

- [1] C.-X. Wang, F. Haider, x. Gao, Y Yang ve D Yuan Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 122–130, 2014. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736752>
- [2] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan ve M. Zorzi, Toward 6G networks: use cases and technologies, *IEEE Commun. Mag.*, 58 (3), 55–61, 2020. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411>
- [3] W. Saad, M. Bennis ve M. Chen, A Vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems, *IEEE Netw.*, 34 (3), 134–142, 2020. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>
- [4] X. You vd., Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts, *Sci. China Inf. Sci.*, 64(1),110301 , 2020. <https://doi.org/10.1007/s11432-020-2955-6>
- [5] T. Taleb, A. Boudi, L. Rosa, L. Cordeiro, T. Theodoropoulos ve K. Tserpes, Toward supporting XR services: architecture and enablers, *IEEE Internet Things J.*, 10(4), 3567–3586, 2023. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3222103>
- [6] A. Ahad, Z. Jiangbina, M. Tahir, I. Shayea, M. A. Sheikh ve F. Rasheed, 6G and Intelligent healthcare: taxonomy, technologies, open issues and future research directions, *Internet Things*, 25, 101068, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101068>
- [7] S. Mihai vd., Digital Twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 24 (4), 2255–2291, 2022. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773>
- [8] S. Ghafoor, N. Boujnah, M. H. Rehmani ve A. Davy, MAC Protocols for terahertz communication: A comprehensive survey, *arXiv*, Jul. 2020, <http://arxiv.org/abs/1904.11441> (erişim tarihi: 07 Şubat 2024).
- [9] M. Z. Asghar, S. A. Memon ve J. Hämäläinen, Evolution of wireless communication to 6G: potential applications and research directions, *Sustainability*, 14(10), 6356, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14106356>
- [10] T. Schneider, Ultrahigh-Bitrate Wireless data communications via THz-Links; possibilities and challenges, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 36 (2), 159–179, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10762-014-0100-1>
- [11] M. A. Akkaş, Terahertz wireless data communication, *Wireless Networks*, 25 (1), 145–155, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11276-017-15>
- [12] H. T. Friis, A Note on a simple transmission formula, *Proc. IRE*, 34 (5), 254–256, 1946. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1946.234568>
- [13] M. W. Shephard vd., Performance of the Line-by-Line Radiative Transfer Model (LBLRTM) for temperature and species retrievals: IASI case studies from JAIVEx, *Atmospheric Chem. Phys.*, 9 (19), 7397–7417, 2009. <https://doi.org/10.5194/acp-9-7397-2009>
- [14] S. Mahboob ve L. Liu, Revolutionizing future connectivity: A contemporary survey on AI-empowered satellite-based non-terrestrial networks in 6G, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 26 (2), 1279–1321, 2024. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3347145>.
- [15] A. I. Alshbatat ve L. Dong, Adaptive MAC Protocol for UAV communication networks using directional antennas, 2010 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), sayfa 598–603, Chicago, IL, USA, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2010.5461589>.
- [16] R. R. Choudhury ve N. H. Vaidya, Deafness: A MAC problem in ad hoc networks when using directional antennas, *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Network Protocols*, sayfa 283–292, Berlin, Germany, 2004, <https://doi.org/10.1109/ICNP.2004.1348118>.
- [17] X.-W. Yao ve J. M. Jornet, TAB-MAC: Assisted beamforming MAC protocol for Terahertz communication networks, *Nano Commun. Netw.*, 7, 2016.
- [18] N. Abuzainab, M. Alrabeiah, A. Alkhateeb ve Y. E. Sagduyu, Deep Learning for THz drones with flying intelligent surfaces: Beam and Handoff Prediction, *ArXiv*, Feb. 2021, <http://arxiv.org/abs/2102.11222> (erişim tarihi: 06 Ekim 2021)
- [19] Q. Xue vd., A Survey of beam management for mmWave and THz communications towards 6G, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2024. <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3361991>
- [20] D. F. Swinehart, The beer-lambert law, *J. Chem. Educ.*, 39 (7), 333, 1962. <https://doi.org/10.1021/ed039p333>
- [21] J. M. Jornet ve I. F. Akyildiz, Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the Terahertz band, *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 10 (10), 3211–3221, 2011. <https://doi.org/10.1109/TWC.2011.081011.100545>
- [22] A. Saeed, O. Gurbuz ve M. A. Akkaş, Terahertz communications at various atmospheric altitudes, *Phys. Commun.*, 41, 101113, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101113>
- [23] Shannon, C. E. (1948). a mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3),

- 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- [24] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841224>.
- [25] G. Anderson vd., *AFGL Atmospheric constituent profiles (0-120km)*, Mayıs 1986.

