

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 015201 (190-200)

AKU J. Sci. Eng. 18 (2018) 015201 (190-200)

DOI: 10.5578/fmbd.66681

Terahertz Teknolojisi Uygulamaları ve Terahertz Dalgalarının Kablosuz Haberleşme için Elektromanyetik Modellemesi

Mustafa Alper Akkaş*Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bolu.**e-posta: alperakkas@ibu.edu.tr.*

Geliş Tarihi:10.12.2016

; Kabul Tarihi:19.03.2018

Özet

Anahtar kelimeler

Terahertz bandı;
Kablosuz iletişim; Ultra
– bit oranı; Kanal
modelleme;
Elektromanyetik
emilim

Bu çalışmada 0.1 ile 10 THz aralığında mikrodalga ve kızılötesi arasında uzanan, elektromanyetik spektrumda çıplak gözle görülemeyen Terahertz (THz) frekanslarının farklı ortamlarda nasıl davrandığı incelenmiştir. Makalenin birinci ve ikinci bölümünde, yüksek hızda kablosuz iletişim için, artan talebi karşılamaya yönelik önemli bir teknoloji olarak öngörülmekte olan Terahertz teknolojisi ve uygulamaları hakkında bilgi verilmiştir. Bu araştırma aynı zamanda hava ve doğal gaz ortamları için hesaplanmış kanal modellenmesi sonucu ortaya çıkan yol kaybı ve emilim kaybı hesaplamalarını göstermektedir. Teorik analiz ve benzetim sonuçları, hava ve doğalgazın THz Bant kısa menzilli kablosuz iletişim kurabileceğini göstermiş ve bu alanda birçok önemli yönlerini vurgulamıştır. Son olarak hava ve doğal gaz ortamı için en ideal performansı sağlayan geçiş pencereleri elde edilmiş ve bu geçiş pencereleri makaledeki grafiklerde gösterilmiştir.

Terahertz Technology Applications and Electromagnetic Modelling of Terahertz Waves for Wireless Communication

Abstract

Keywords

Terahertz band;
Wireless
communications;
Ultrahigh-bitrate;
Channel modelling;
Electromagnetic
absorbance

This paper investigates the behavior of different medium of Terahertz frequencies in the electromagnetic spectrum which is invisible to the naked eye, lying between microwave and infrared in the range from 0.1 to 10 THz. First and second part of the paper gives the information of THz communications which have recently gained greater interest and expectation to meet an ever increasing demand for the speed of wireless communications. This paper also shows the calculating of path loss and attenuation loss data in air and natural gas environment which is resulting in channel modeling. The theoretical analysis and the simulation results prove the feasibility of short range wireless communication in the THz Band in air and natural gas and highlight several important aspects in this field. Finally the frequency window, which provides best performance, has been determined for air and natural gas environment and these frequency windows has been showed in the graphics of the paper.

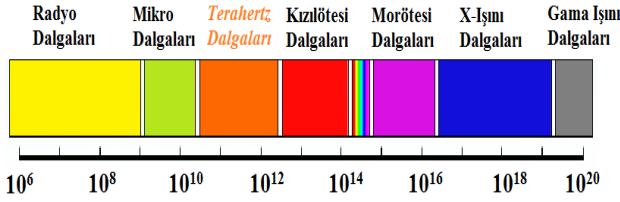
© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

THz (Terahertz) dalgaları elektromanyetik spektrumunda genellikle 0.1 – 10 THz aralığında değişen, limitleri tam olarak belirlenmemiş elektromanyetik dalgalardır. T-dalgaları; T-ışınları, T-ışık, T-lux, THz olarak da adlandırılmaktadır. THz dalgaları elektromanyetik spektrumunda genellikle 0.1 – 10 THz aralığında değişen geniş bir bölgede yer almasına rağmen fazla keşfedilmemiş, yeniliklere ve yeni araştırma alanlarına açık bir bant aralığıdır. THz

ışması, elektromanyetik spektrumun diğer bölümlerine nazaran daha fazla özellik içermektedir. THz dalgaları hemen hemen her maddeden belli bir derecede geçebilir fakat THz dalgaların emilimi su ve metalde kat ve kat azalmaktadır. THz dalgaları belli frekanslarda geçtiği molekülleri titreştirir. Titreşen moleküller THz dalgaların geçmesini zorlaştırır, bu yüzden THz dalgaların iletişim mesafesini artırabilmek için THz dalgalarının uygulandığı maddenin titreşimsiz frekans aralığı araştırılmalı yani

geçiş pencereleri bulunmalıdır. THz dalgalarının birçok kullanım alanı vardır. Sadece kablosuz iletişimde değil aynı zamanda görüntüleme teknolojilerinde, savunma sanayinde, nesnelerin internetinde, nano telsiz duyurga ağlarının haberleşmesi gibi yeni teknolojilerin önünün açılmasına olanak sağlayacaktır (T. Nagatsuma ve ark. 2016), (Pawar ve ark. 2013).



Şekil 1. THz Dalgalarının Elektromanyetik Spektrumun da Gösterilmesi

Aynı zamanda görüntüleme teknolojisinde kullanılan THz dalgaları X-ışınlarına nazaran daha az zararlıdır çünkü THz dalgaları dokuları iyonize etmez ve bu özelliği sayesinde anlık görüntüleme ya da diğer röntgen işlemlerinde birçok kez kullanılabilir (Liu HB ve ark. 2007).

THz iletişimi, son zamanlarda kablosuz iletişimin hızına artan talebi karşılamak için daha fazla ilgi ve beklenti kazanmıştır. Araştırmalar, THz boşluğunda odaklanmıştır çünkü yüksek taşıma frekansları, görülmemiş kanal kapasitelerine ulaşmayı vaat etmektedir. THz'in, THz görüntüleme, THz spektroskopi, Mikroelektro-mekanik sistemler (MEMS) THz Sistemi, THz iletişimi vb. sayısız uygulamaları vardır. Bu araştırmada ise kablosuz iletişimin en çok kullanıldığı ortam olan hava ortamının, nasıl modellendiği gösterilmiş ve bu modellenmenin sadece hava ortamı için değil aynı zamanda farklı gazlar içinde kullanılabilmesi belirtilmiştir. Farklı gazlara örnek ise doğal gaz ortamı için verilmiştir. Hava ve doğal gaz için emilim ve toplam kayıpta hesaplanarak, ileride THz frekansında hava ve doğal gaz ortamında çalışacak araştırmacılar için değerler elde edilmiştir.

2. Terahertz Teknolojisi Uygulamaları

2.1 Görüntüleme Teknolojileri

THz dalgaları, kızıl ötesi alana yakınlığı sayesinde farklı görüntüleme uygulamaları ve zararsız

görüntüleme kapsamında THz görüntülemenin tasarımı ve inşası için adapte edilebilip kullanılabilir. THz görüntüleme uygulamaları güvenlik alanında oldukça önemli yer bulmuştur. Özellikle THz görüntüleme nesnelerin arkasını, içini görmesi ve iyi bir çözünürlüğe sahip olması sayesinde daha çok hava alanlarındaki kontrol noktalarında insanların üzerini tarama maksatlı kullanılmaktadır. X-ray cihazlarıyla kıyaslandığında, insan vücuduna ve kullanan operatöre daha az zarar vermektedir. THz görüntüleme, aktif ve pasif kaynak olmak üzere ikiye ayrılır. Aktif kaynaklı sistemler, THz dalgasını oluşturabilecek bir kaynak içerir; pasif kaynaklı sistemler ise güneş enerjisinden gelen THz dalgalarını ölçebilen sistemlerdir (Mittleman ve ark. 1999).

Ülkemizde de farklı projelerde, THz'in görüntüleme teknolojisi kullanılarak geliştirilmektedir. (Nazli ve ark. 2010) çalışmasında gerçekleştirilen 'THz Dalga Üretici ile Spektroskopik Algılama Prototipi ve THz Görüntüleme Prototipi' pasif kaynaklı sistem metodu ile ölçüm yapabileceği ve 0.1 ila 3 THz aralığında çalışan bu sistemin 10 metre uzaklığa kadar 3 santimetre çözünürlüğünde görüntü elde edilebileceği belirtilmiştir. Sistemin THz dalgalarını kullandığı için sis altında da rahatlıkla çalışabileceği belirtilmektedir. Hava alanlarında da sağlıklı bir şekilde kullanılabilmesi belirtilen sistemin, kişinin, özel X-ray cihazlarından geçmeden üzerinde zararlı bir obje olup olmadığını kontrol edebileceği belirtilmiştir. THz görüntüleme teknolojisinin gelişmesi, farklı endüstrilerde kullanılan fiber kompozit kalite kontrolünü yapabileceğini göstermektedir. Ayrıca THz görüntüleme tahribatsız ölçme yeteneği sayesinde gıda ürünlerinde de kalite kontrolü detaylı bir şekilde yapabileceği belirtilmiştir.

2.2 Spektroskopi

Spektroskopi, elektromanyetik ışımının madde ile etkileşimini inceler. Elektromanyetik dalgalar, özellikle THz dalgaları madde ile etkileşimi sonucu maddenin moleküllerinde dönme, makaslama gibi farklı titreşim hareketleri oluşturur. Moleküllerde oluşan bu hareketlilikle, moleküllerin enerji seviyelerinde değişiklikler meydana gelir.

Moleküllerin enerji seviyelerinde meydana gelen değişiklikler, spektroskopinin temel inceleme alanıdır. THz frekansların, moleküllerin, süper iletkenliklerinin, iletken malzemenin plazmonik etkileri ve dönme evreleri gibi farklı alanların incelenmesinde spektroskopiden faydalanılmaktadır. Bir çok malzemenin rezonans frekansı, THz frekansları içindedir. Moleküllerin hareketleri genel olarak ikiye ayrılır. Bunlar; titreşim ve dönme olarak adlandırılmaktadır (Jepsen ve ark. 2011). Dönme hareketi adından da anlaşılacağı gibi tıpkı bir sarkacın dönmesi gibi moleküllerin ağırlık merkezi etrafında dönmesiyle, asimetrik bir molekülün dipol momentinde değişiklik meydana getirir. Titreşim hareketi ise gerilme ve eğilme olarak ikiye ayrılır. Gerilme hareketi, tıpkı bir yay gibi iki atom arasındaki bağların simetrik veya asimetrik gerilmesi sonucunda ortaya çıkar. Eğilme titreşimleri ise makaslama ve yana burulma titreşimleridir. Titreşimlerin olduğu bölgelerde THz dalgaların emilimi artar. Kalabalık bir ortamda bir insanın yürümesi nasıl zor olursa, bunun tam tersi olan düz sıra halinde dizilmiş insanlar arasından geçmenin daha kolay olması titreşim örnekleri olarak verilebilir. Hangi molekülün nerede titreştiğini gösteren önemli metotlardan biri ise spektroskopidir (E. Hack. ve ark. 2016)

2.3 MEMS (Mikro Elektrik-Mekanik Sistemler)

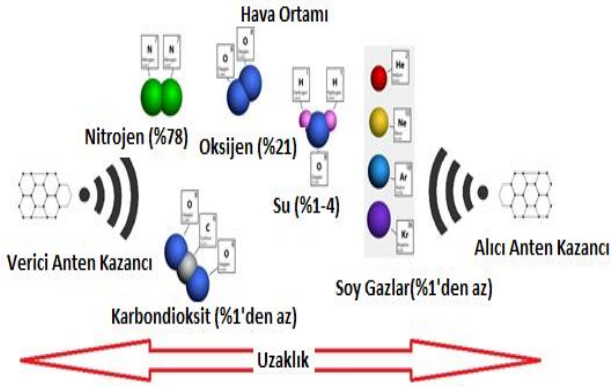
1959 yılında Nobel ödüllü fizikçi Richard Feynman 'Aşağıda Oldukça Fazla Yer Var!' (There's Plenty of Room at the Bottom!) başlıklı konuşmasında, eğer nano boyutlarda üretim yapılabilirse birçok yeni keşiflerin doğabileceğini belirtmiştir (Feynman, 1992). Feynman konuşmasında, nano ölçekte özel ölçme ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiğini özellikle vurgulamıştır. Feynman'ın bu konuşması nano bilim ve nano teknolojinin başlangıcı kabul edilmektedir. MEMS gelecek hayatımızı şekillendirebilecek hızla büyüyen ve gelişen büyük bir potansiyele sahip bir teknolojidir. Bu teknolojiyi kullanarak, aynı entegre üzerinde mikro elektronik devreler veya mekanik yapıları entegre edip mikro sistem boyutunu azaltırken, tek parçada entegrasyon sağlayan ve maliyeti oldukça düşük cihazların üretilmesi sağlanmaktadır (Grbovic ve Karunasiri, 2009). MEMS teknolojisinin katkısı da

sayesinde Nano düğümlerin haberleşmeleri, moleküler ya da nano-elektromanyetik olarak sağlanacağı ve Nano düğümlerin haberleşme biriminde grafen temelli antenlerin yer alacağı belirtilmektedir (Llatser ve ark. 2012). Karbonun tek atom kalınlığındaki yapısı olarak tanımlanan grafen, olağanüstü mekanik mukavemet, sıra dışı elektronik ve termal iletkenlik, gazlara karşı sızdırmazlık özellikleri ile birlikte diğer fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kombinasyonu sonucu, yaygın uygulama alanlarında potansiyel kullanıma sahip ilgi çekici bir malzemedir. Grafenin önemli yapısal özellikleri arasında saflığı, hata yoğunluğu, kalınlığı ve boyutu gelmektedir. Bu üstün özelliklerinden dolayı nano düğümlerden grafen bazlı antenler kullanılması hedeflenmektedir. Kablosuz bağlantı üzerinden büyük dosyaları aktarırken, kullanıcılar çeşitli sorunlarla karşılaşmaktadırlar. Georgia Teknoloji Enstitüsü'nden Prof. Dr. Ian F. Akyildiz' in önderliğinde yapılan araştırmalarda, ince grafenden yapılmış antenler sayesinde terabit boyutlarında verinin saniyeler içinde gönderilebilmesi için çalışılmaktadır. Bu hızlı veri akışının yine THz bantları kullanılarak yapılması hedeflenmektedir (Jornet ve Ian, 2013).

2.4 İletişim Sistemleri

THz dalgalar metal ve sıvı dışındaki ortamlardan geçmekte zorlanmazlar fakat belli frekanslarda moleküller titreşimler gösterirler. Titreşimlerin olduğu bölgelerde THz dalgaların emilimi artar. Daha önce verilen örnek "kalabalık bir ortamda bir insanın yürümesi nasıl zor olursa, bunun tam tersi olan düz sıra halinde dizilmiş insanlar arasından geçmenin daha kolay olacağı" yine burada da verilebilmektedir. THz dalgalar titreşimsiz bölgeleri severler. Hangi molekülün nerde titreştiğini gösteren çeşitli metotlar vardır. Kimyada genellikle kızıl ötesi spektroskopi cihazı, hangi frekans aralığında emilimin arttığını göstermektedir (Colthup, 2012). Bir başka metot ise HITRAN (High-Resolution Transmission Molecular Absorption) parametreleridir. Kablosuz haberleşme genellikle hava ortamında olmaktadır (Rothman ve ark. 2009), (J.S. Wilzewski ve ark. 2016). Farklı ortamlarda kablosuz haberleşme özellikleri incelenecekse, o ortamın THz bandında nasıl davrandığı

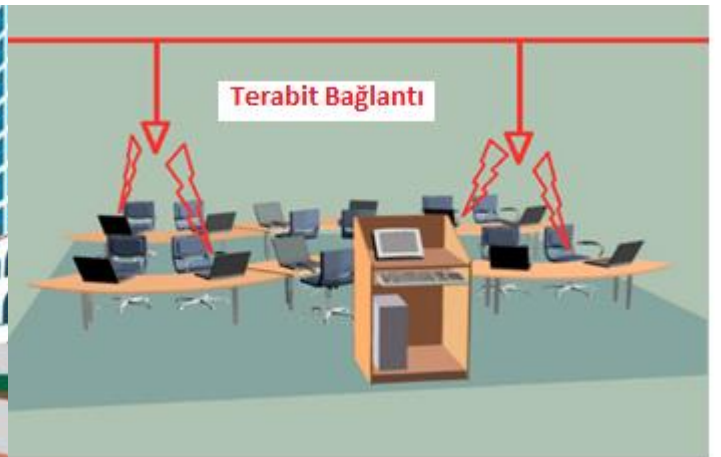
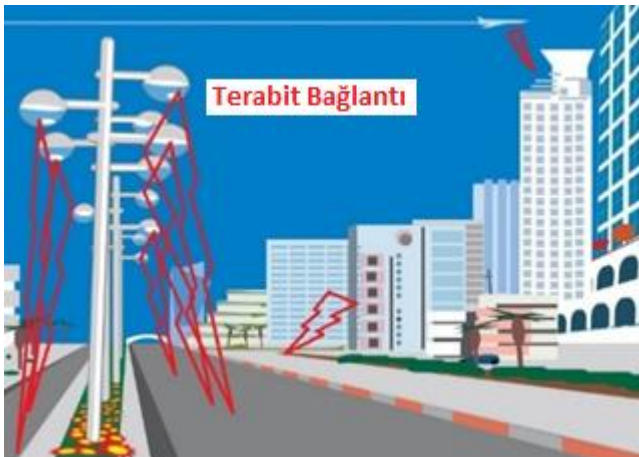
incelenmelidir. Bu araştırmada, örnek olarak hava ve doğal gaz ortamın THz haberleşmede nasıl bir tepkime gösterdiği incelenmektedir. Havayı oluşturan elementler belirli yüzdelerde değişiklik gösterirler. Bu yüzdeler belirli bir standarda göre ayrılmıştır. En çok kullanılan USA ve IAO standartlarıdır. USA ve IAO standartlarının molekül dağılımları Çizelge 1 de verilmiştir. Hava ortamının USA ve IAO standartlarına göre modellemesi, Terahertz Dalgalarının Kablosuz Haberleşme için Elektromanyetik Modellemesi bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır. Şekil 2 de ise alıcı ve verici anten arasında bulunan havanın, genel yüzdelerine göre kablosuz haberleşmesinin bağlantı şekli gösterilmiştir.

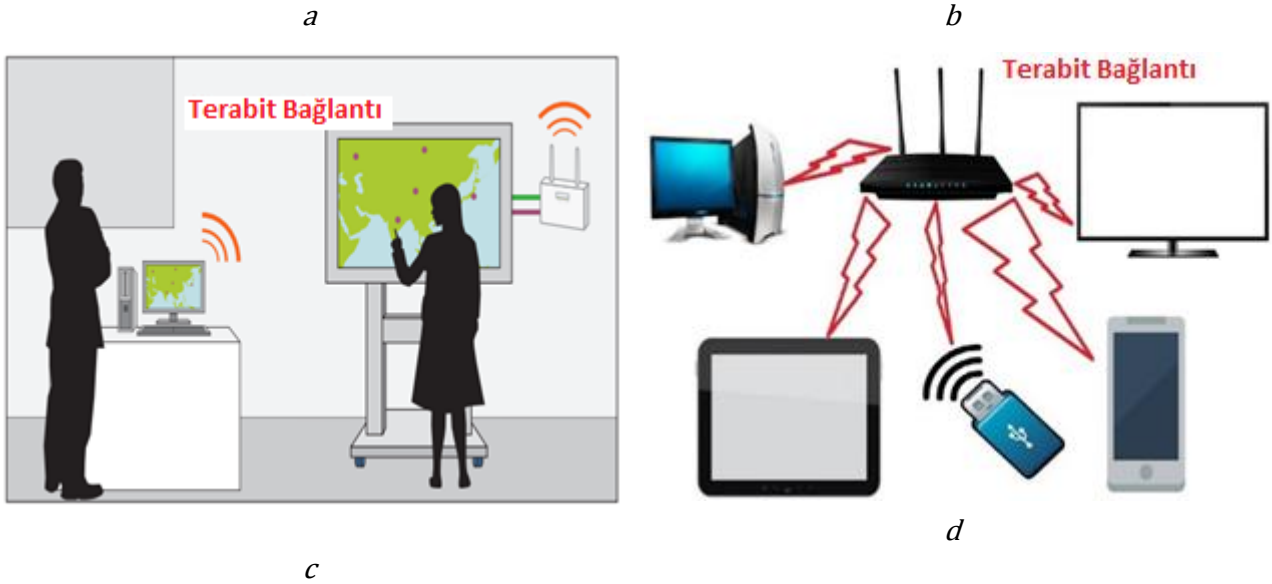


Şekil 2. THz ortamında kablosuz haberleşme (Akkaş, 2017)

Çizelge 1. USA ve IAO hava standartlarının molekül dağılımları.

	H ₂ O	CO ₂	O ₃	N ₂ O	CO
USA1	1.862987	0.032701	0.000003	0.000032	0.000015
USA2	0.432000	0.033000	0.000003	0.000032	0.000015
USA3	1.190000	0.033000	0.000002	0.000031	0.000015
USA4	0.141000	0.033000	0.000002	0.000032	0.000015
USA5	2.590000	0.033000	0.000003	0.000032	0.000015
IAO1	1.560000	0.033300	0.000002	0.000028	0.000047
IAO2	0.588000	0.033300	0.000002	0.000028	0.0000471
IAO3	0.651000	0.033300	0.000002	0.000028	0.000047
IAO4	0.065484	0.033496	0.000002	0.000028	0.000047
IAO5	2.380.000	0.033300	0.000002	0.000028	0.000047
	CH ₄	O ₂	SO ₂	NH ₃	N ₂
USA1	0.000168	20.71086	0.000000	0.000000	77.393229
USA2	0.000170	20.90000	0.000000	0.000000	78.100002
USA3	0.000170	20.90000	0.000000	0.000000	78.100002
USA4	0.000170	20.90000	0.000000	0.000000	78.100002
USA5	0.000170	20.90000	0.000000	0.000000	78.100002
IAO1	0.000148	20.70000	0.000008	0.000001	77.706466
IAO2	0.000148	20.70000	0.000008	0.000001	77.706466
IAO3	0.000148	20.70000	0.000008	0.000001	78.615466
IAO4	0.000149	20.82199	0.000008	0.000001	79.078788
IAO5	0.000148	20.70000	0.000008	0.000001	76.886466



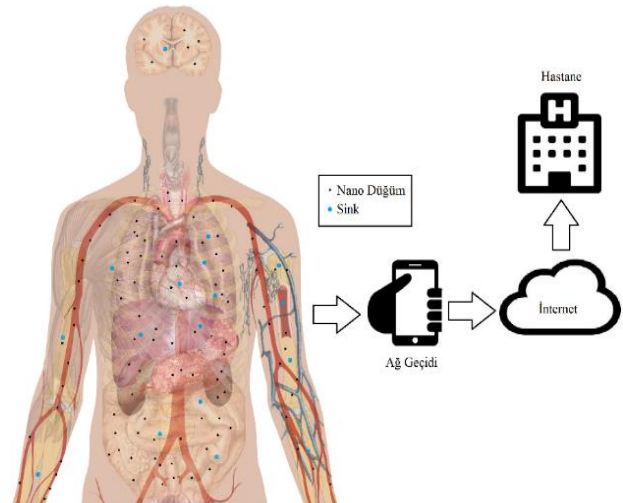


Şekil 3. THz kablosuz haberleşme uygulamaları (Akkaş, 2017)

THz dalgaların gelecekte birçok teknolojiye kullanılması hedeflenmektedir. Bunlardan başlıcası ise, kablosuz haberleşmedir. THz Dalgalarının, Kablosuz Haberleşme için Elektromanyetik Modellemesi bölümünün de detaylı olarak anlatıldığı gibi, THz dalgalarının iletişim mesafesi kısa fakat ilettiği bilgi miktarı çok fazladır. İletişim mesafesinin kısa olmasından dolayı baz istasyonlarının caddelerde lambaların içerisine, ofiste tavana, sınıf ortamında ise bilgisayara yakın prize monte edilmesi düşünülmektedir. Ultra hızlı bu bağlantılar, 5G teknolojisinin de alt yapısını oluşturmaktadır (Wang ve ark. 2014). Bu bağlantı şekilleri Şekil 3a, 3b ve 3c’de gösterilmektedir. Taşınabilir belleklerin yıllara göre kapasiteleri hızlı bir şekilde artmaktadır. 2005 yılında Toshiba ilk 1 GB taşınabilir belleği yaptığını açıklamış, aynı yıl ise Samsung dünyanın ilk 2GB taşınabilir belleğini yapmıştır (Shilov, 2008). 10 yıl gibi bir sürenin ardından taşınabilir belleklerin kapasitesi 10000000 kat artmış ve Intel ve Mikron 10 TB kapasiteli standart SSD boyutlarında taşınabilir bellek geliştirilmiştir (Borghino, 2015). Teknolojinin bu hızla gelişmeye devam ettiği düşünülse bile beş yıl sonra taşınabilir belleklerin 1 EB (1 EB (exabit)= 1×10^6 TB) boyutlarına ulaşabileceği hesaplanabilir. Bu örnekler doğrultusunda, insanoğlunun çok değil 5 yıl sonra ise grafen antenleri ile desteklenmiş kablosuz taşınabilir belleklere sahip olacağı düşünülebilir. THz haberleşmesi sayesinde kullanılan bant genişliğine göre 1 terabitlik bir veri, 1 saniyede kablosuz olarak aktarılabilir. Bu hız

öngörülen iletişim hızının neredeyse en düşüğüdür (Burke, 2004). Şekil 3d de görüldüğü gibi bilgisayarlarda, telefonlarda, televizyon ve tabletlerde veri hızının artmasına olanak sağlayacaktır. Anlık veri iletişimde hızı arttığı için uzaktan ameliyat, trafik kontrolü, araçların haberleşmesi gibi zaman hassasiyeti gerektiren teknolojilerde büyük çaplı iyileşme sağlanacağı belirtilmektedir (Luukanen ve ark. 2004).

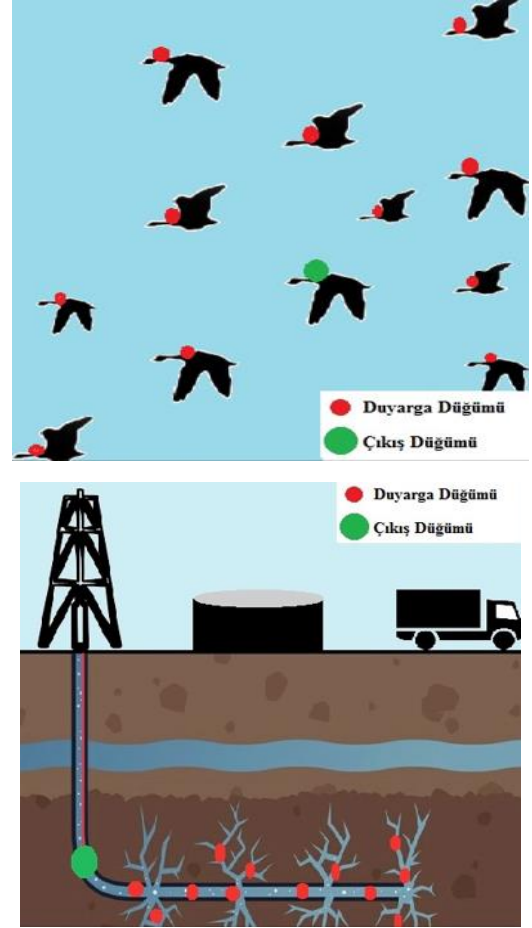
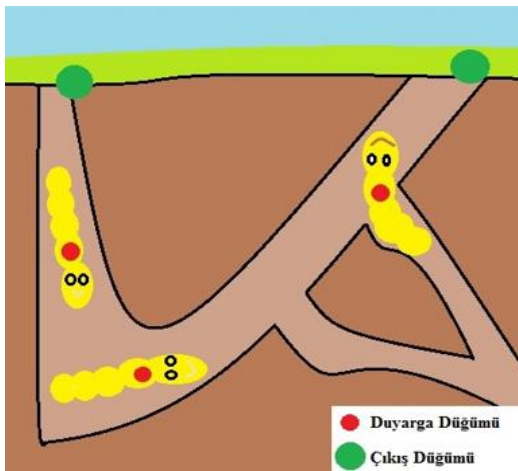
2.5 Telsiz Duyarga Ağları



Şekil 4. THz kablosuz haberleşme uygulamaları

THz teknolojinin şüphesiz en çok etkileyecek alanlardan biri ise telsiz duyarga ağlarıdır. Telsiz duyarga ağları gelişen nano teknoloji sayesinde çok daha küçük boyutlarda üretilebilecektir. Nano boyutta üretilen telsiz duyarga ağları vücut içi

haberleşmede öncülük edecektir. Nano boyutta telsiz duyurga ağları moleküler ve elektromanyetik olarak haberleşebilecektir. Moleküler haberleşme nano ölçekli ağlar için umut verici bir iletişim metodudur. Moleküler haberleşme, bir kimyasal tepkimeyi ya da koku, ışık, tat gibi değişimleri nano düğümler sayesinde nano ağ kullanarak birbirleriyle haberleşmesini öngören haberleşme çeşididir (Blalock, 1989). Moleküler haberleşme, klasik haberleşmede olduğu gibi alıcı, verici ve ortamdan oluşmaktadır. Moleküler haberleşmede alıcı, alıcı nano makine, verici de verici nano makine olarak adlandırılırsa, ortam da moleküllerden oluşan difüzyon kanalına benzetilebilir. Moleküler ve alıcılar arasındaki haberleşme metodu, biyolojideki ligand-alıcı yapışma olarak adlandırılan fenomenine benzemektedir. Örnek verilecek olursa, endokrin sistemi hormonlardan ve salgı bezlerinden oluşmaktadır. Vücudun tüm sistemleri bu salgı bezleri sayesinde haberleşmektedir. Bu haberleşme sayesinde vücudun büyüme, gelişme gibi birçok değişkeni kontrol edilmektedir (Dixon ve Lamb, 1990., Hiyama ve ark. 2006). Hormonlar kan yolu ile taşınmakta ve bu etkileşim çok yavaş işleyen mekanizmalardan oluşmaktadır. Hormonun etkilediği hücreler ilgili bilgiyi aldıktan sonra, bu bilgiyi azaltacak yeni bir hormon salgılanmasına yol açmaktadırlar ve bu sayede haberleşme denge içinde ve yavaş olarak devam etmektedir (Atakan ve Ozgur, 2007, Kuran ve Moritani, 2010).



Şekil 5. THz kablosuz haberleşme uygulamaları (Akkaş, 2017)

Telsiz duyurga ağlarının diğer uygulamaları ise nano düğümler kadar olmasa da mili düğümler sayesinde yapılabilecek olan uygulamalardır. Bunlara örnek verilecek olursa, Şekil 5'te gösterildiği gibi yer altı canlıları ile yer altının gözlemlenmesi, yer üstü canlılarıyla havanın gözlemlenmesi, petrol ve doğal gaz çıkartılması gibi örnekler verilebilir. Bu örneklerin daha da detaylandırılması düşünülürse, telsiz duyurga ağlarının boyutlarının küçülmesinde en büyük etkenlerden biri antendir. Anten boyutunu küçültmek için yüksek frekanslara ihtiyaç vardır. THz bandında çalışan grafen antenler buna en güzel çözümdür. Bu araştırma da yer altı gazlarından doğal gazın en yüksek yüzdeli bileşeni olan metanın da nasıl modellendiği grafiksel olarak gösterilecektir.

3. Terahertz Dalgalarının Kablosuz Haberleşme için Elektromanyetik Modellemesi

Daha önceden denenmemiş, deney ortamının kurulması zor ve henüz uygulama yapma teknolojisinin yakalanmadığı durumlarda simülasyonlar ve matematiksel modellemeler

devreye girmektedir. Similasyonlar ve matematiksel modellemeler, deney ortamında nasıl bir sonuçla karşılaşılacağı hakkında bilgi verip, tahminlerde bulunmayı sağlamaktadır. Bu araştırmada ise, deney ortamında, analizi hali hazırdaki teknoloji ile zor olan, THz dalgalarında farklı gazlar için kanal modellemesi yapıp, ortamın iletişim özellikleri incelenmektedir. Gaz olarak ise kablosuz iletişimin en çok kullanıldığı hava ortamı seçilmiştir. Hava ortamına farklı bir örnek olması açısından daha sonra doğal gaz ortamı incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan modelleme 5G ve ötesi uygulamalarında, THz alıcıların geliştirilmesinde ve uygulama ortamında kullanılacak en ideal frekans aralığı hakkında okuyuculara bilgi vermektedir.

Radyo dalgaları belli bir mesafede yayılırken yayıldıkları ortamdan ve boş alan yol kaybından kaynaklanan emilimlere maruz kalırlar. Bu çalışmada da THz dalgalarını nasıl bir emilime maruz kaldıkları incelenmektedir. THz dalgalarının modellenmesinde, başlangıç formülü diğer dalga aralıklarında olduğu gibi Friis denklemidir (Friis, 1946). Friis denklemi denklem(1)'de gösterilmiştir. Denklem(1)'de boşluk ortamında P_t verici antenin taşıma gücünü, d uzaklık, G_r ve G_t alıcı ve verici antenlerin kazancı, L_0 ise boş alan yol kaybı olan $L_0=32.4 + 20\log(d) + 20\log(f)$ 'e eşittir. d uzaklığın birimi km ve frekans değeri ise MHz'dir.

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

Fakat THz ortamı haberleşmesinde boş alan yol kaybına ek olarak ortamdan kaynaklanan kayıp ve gürültü kaybı olan sistem kaybı eklenmelidir. Ortamın kaybının ve gürültünün de eklenmiş halinde formülün yazılması denklem (2)'de gösterilmektedir.

$$P_r(dBm) = P_t(dBm) + G_r(dB) + G_t(dB) - L_0(dB) - L_{Gürültü}(dBm) - L_{Ortam}(dB) \quad (2)$$

Gürültü kaybının dBm şeklinde açılmış hali denklem (3)'te gösterilmektedir.

$$L_{Gürültü} = 10\log_{10}(1000 * k * T * B) (dBm) \quad (3)$$

Burada T 'nin birimi Kelvin, B ise Hz cinsinden frekans bant genişliğidir. k ise Boltzmann sabiti olan yaklaşık olarak 1.3801×10^{-23} J/K eşittir. Sıcaklık bu araştırmada, ortam sıcaklığı olan 296 Kelvin alınmıştır.

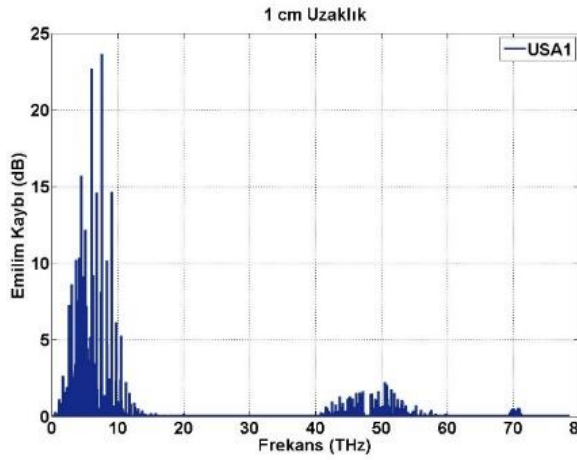
EM dalgaların, araştırmanın çeşitli bölümlerinde bahsedildiği gibi, özellikle THz bantlarında yayılımı zorlaşır. Ortamı oluşturan bileşenler gaz bile olsa bazı noktalarda soğurma kaybı çok büyük değerlere ulaşır, sonuçları etkileyebilecek büyüklüklere gelebilir. THz Bantlarında her molekülün titreşimi farklı frekanslarda, farklı titreşimler göstermektedir. EM dalgalarının, tıpkı kalabalık bir ortamda hareket etmenin zor olduğu gibi, titreşimlerden zor geçeceği için soğrulmaları artmıştır. Bu bölümde hava ortamının, sistem modellemesini nasıl etkileyeceği araştırılmaktadır.

FTIR (Fourier kızılötesi spektroskopisi) gösteren molekül bağlarının ölçülmesi ve kızıl ötesin radyasyonun nasıl ölçüldüğünü göstermektedir. Kızıl ötesi radyasyon, moleküllerin titreşim hareketleri ile emilir. Kızıl ötesi bölümdeki titreşim hareketleri spektral piklerin oluşturulmasını sağlar. Bu pikler moleküllere ve bakterilere özgü kendi içerisinde değişir ve bu sayede molekül ve bakterilerin birbirinden ayrılmasını ve sınıflandırılmasını sağlar (Naumann ve ark. 1991). Bu araştırmada HITRAN parametreleri kullanılarak, Çizelge 1 de kullanılan hava ortamını oluşturan gazların moleküllerini FTIR radyasyonun emilimi, yani hava moleküllerinin titreşimli ve titreşimsiz bölgeleri incelenmektedir. Bunun için denklem (4) kullanılarak sistem kaybına eklenen ortam soğurma kaybı hesaplanılmıştır.

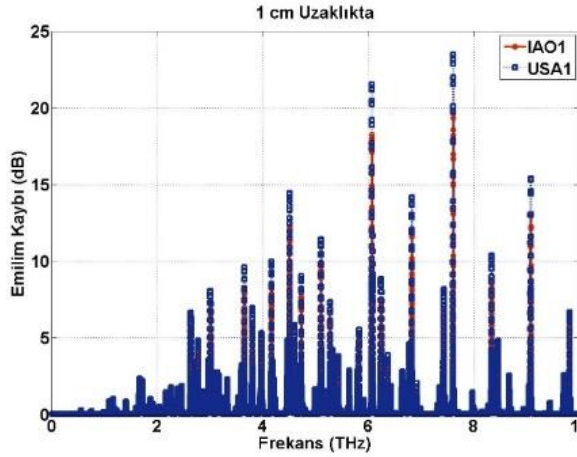
$$L_{Ortam}(f, d) = k(f)_{gaz} * d * 10 * \log_{10}e (dB) \quad (4)$$

Denklem (4) deki $k(f)$ katsayısı gaz ortamının frekansa göre değişen soğurma katsayısını vermektedir. Bu soğurma katsayısının değeri ise HITRAN parametrelerinden elde edilmiştir. $k(f)$ katsayısı modellenecek ortama göre değişmekte ve modellenecek ortamın bileşenleri ne ise o değeri almaktadır. Örneğin hava ortamında Çizelge 1’de gösterilen 10 farklı havayı oluşturan bileşiklerin soğurma katsayısı kullanılmış ve bu sayede tüm havanın soğurma katsayısı elde edilmiştir.

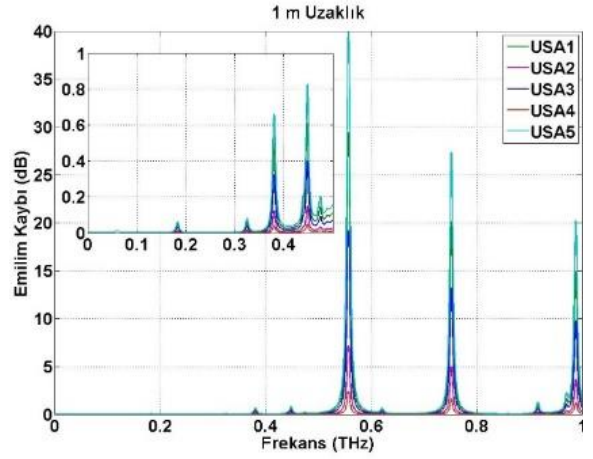
4. Sayısal Sonuçlar ve Tartışma



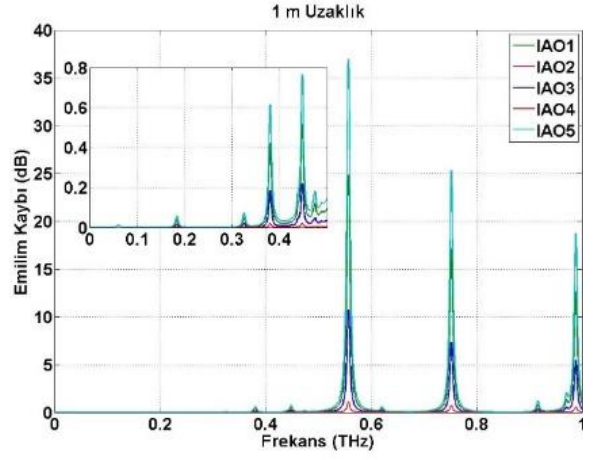
a



b



c

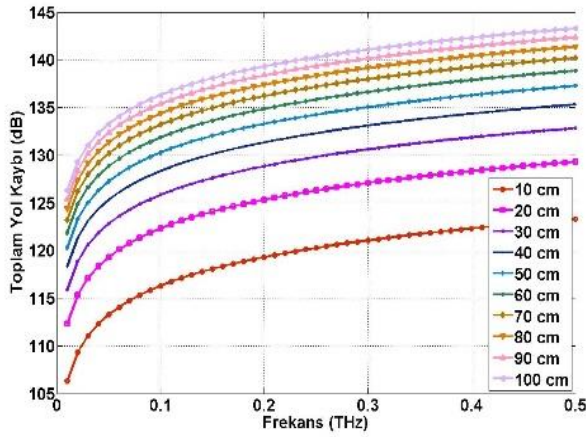


d

Şekil 6. Hava ortamının frekansa göre emilim kaybı

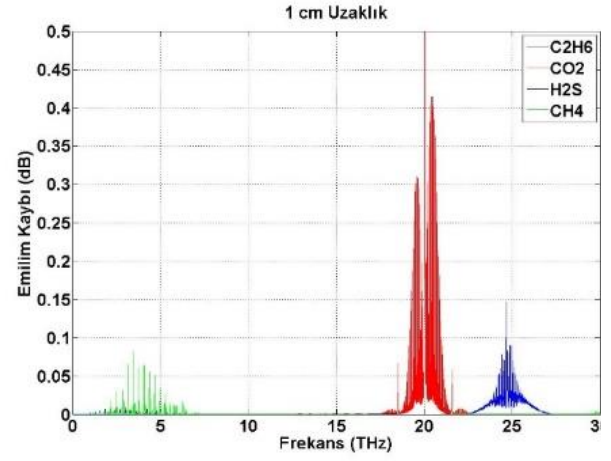
Şekil 6 da hava ortamının frekanslara göre emilim kaybı incelenmiştir. Şekil 6a’da uygun geçiş pencereleri bulanabilsin diye 0.01 THz – 80 THz aralığı olan geniş bir bant aralığı seçilmiştir. Şekil 6a detaylı incelendiğinde, 0.01 THz – 1 THz, 15THz – 40 THz aralığında, 60 THz – 68 THz aralığında ve 72 THz – 80 THz aralığında olmak üzere çeşitli geçiş pencereleri olduğu gözlemlenmektedir. Araştırma da detaylı incelemeler, mümkün olan en düşük THz bandı olan 0.01 THz – 10 THz bant aralığında gerçekleştirilmiştir. 0.01 THz – 10 THz aralığının daha net görüntüsü Şekil 6b de, 0.01 THz – 10 THz aralığının gösterdiği şekilde incelenebilir. Şekil 6a ve Şekil 6b incelenirken dikkat edilmesi gereken bir başka konu ise verilen emilim kaybı değerleri 1 cm uzaklıkta olduğudur. Şekil 6c ve Şekil 6d üzerinde bulunan 0.01 THz – 0.5 THz aralığında emilim kaybını gösteren grafikler incelendiğinde de, neredeyse 0.3 THz’e kadar hiçbir kaybın olmadığı anlaşılmaktadır.

Şekil 6c ve Şekil 6d ise 0.01 THz – 1 THz’de yer alan maksimum titreşimlerin olduğu aralık, IAO ve USA hava modeline göre detaylı olarak gösterilmiştir. Şekil 6c ve Şekil 6d, 1 m uzaklıktaki emilim kayıplarını vermektedir. Şekil 6c ve Şekil 6d den de anlaşıldığı gibi THz bandında en ideal geçiş penceresi, grafikler üzerinde de büyütülmüş şekilde gösterilen 0.01 THz – 0.5 THz bant aralığıdır. Daha yüksek bantlarda emilim daha fazla düşürülebilir fakat bu sefer toplam yol kaybı artacaktır. 0.01 THz – 0.5 THz aralığı THz hava ortamında en ideal geçiş penceresidir. Şekil 6c de IAO modeli, Şekil 6d de ise USA modeli gösterilmiştir. Her iki modelin değerleri birbirine çok yakındır ve bunun en büyük sebebi ise Çizelge 1 de gösterildiği gibi IAO ve USA modelinde değişiklik arz eden moleküllerin, THz ortamında toplam yol kaybını yüzde olarak çok az etkilemesidir.

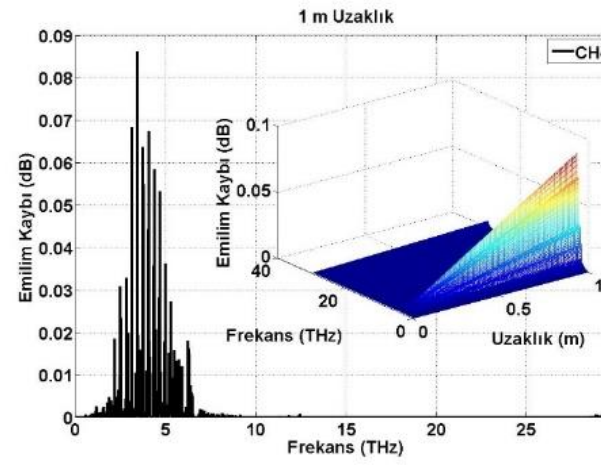


Şekil 7. Hava ortamının frekansa göre toplam yol kaybı

Şekil 7’de denklem (2)’den elde edilmiş toplam yol kaybı verilmiştir. Şekil 7 detaylı incelendiğinde, 10 cm uzaklıkta toplam yol kaybı 105 dB’e yaklaşmaktadır. Şekil 3’de gösterildiği gibi THz uygulamalarının birçoğu batarya bağımlısı değildir ve batarya bağımlısı olan cihazlar içinde gün geçtikçe daha yüksek değerli ve daha küçük bataryalar üretilmektedir. Ayrıca Şekil 7, emilim kaybından ziyade yol kaybının çok yüksek değerlere ulaşmakta olduğunu ve bu yüzden, emilim kaybının da çok yüksek değerlere ulaşmadığı ideal pencere geçişlerini yakalamanın çok önemli olduğunu göstermektedir. 0.01 THz – 0.5 THz aralığında neredeyse hiç emilim kaybı olmamasına rağmen toplam yol kaybı 100 dB’ nin üstüne çıkmaktadır.



a



b

Şekil 8. Doğal gaz ortamının frekansa göre emilim kaybı Doğal gazın %90’lık bir kısmı hidrokarbon bileşiği olan Metan gazından (CH₄) oluşmaktadır. Diğer bileşenleri ise; propan(C₃H₈), etan (C₂H₆), butan (C₄H₁₀) gazlarıdır. İçeriğinde çok az miktarda karbondioksit (CO₂), azot (N₂), helyum(He) ve hidrojen sülfür (H₂S) de bulunmaktadır.

Şekil 8 de kullanılan k(f) katsayıları yine HITRAN parametrelerinden elde edilmektedir. Şekil 8a’da, doğal gazı oluşturan bileşiklerin yüzde dağılımlarına göre denklem(4)’ten elde edilmiş emilim kaybını göstermektedir. Şekil 8a detaylı incelendiğinde, 20 THz civarında CO₂, 2 Thz – 6 THz civarında CH₄, 25 THz civarında ise H₂S’in titreşim gösterdiği gözlemlenmektedir. CO₂ ve H₂S doğal gaz bileşenlerinde çok az miktarda oldukları ve ayrıca emilim kaybının önemsenmeyecek boyutlarda olduğu için Şekil 8b elde edilmiştir. Şekil 8b, CH₄ gazının 30 THz kadar olan emilim kaybını vermektedir. Şekil 8b genel olarak yer altı nano telsiz duyurga ağlarının doğal gaz ortamında kablosuz olarak nasıl haberleşeceğini gösteren bir kılavuz

niteliğindedir. Hava ortamında olduğu gibi, doğal gaz ortamında da 0.01 THz – 0.5 THz aralığı kullanılabilir. Bu sayede hava ortamı için tasarlanan alıcı ve vericiler aynı zamanda doğal gaz ortamında da kullanılabilir. Bu değerler okuyuculara sadece kanal modellemesi değil, aynı zamanda THz frekans aralığında tasarlayacağı algılayıcılar içinde bir klavuz niteliğindedir.

5. Sonuçlar

Bu araştırmada geleceğin önde gelen teknolojilerinden olan THz dalgaları yardımıyla ne tarz uygulamaların gelişebileceği hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Bu uygulamalardan 5G teknolojisi, vücut içi haberleşme, THz kişisel alan ağı ve THz Yerel Alan Ağlarında nasıl kullanılabileceğinin uygulamaları anlatılmaktadır. Bu uygulamaların içerisinden THz dalgaların, hava ve doğal gaz ortamında nasıl hareket ettiklerinin matematiksel modeli gösterilip, ardından grafiksel sonuçlar elde edilmiştir. THz dalgalarının telsiz duyurğa ağlarının kullanım alanlarını ne derece genişletebileceği örneklerle gösterilmiştir. Hava ve doğal gaz bileşenlerini teker teker modelleyip, bu bileşenler için en ideal geçiş penceresi olan 0.01 THz – 0.5 THz aralığı elde edilmiştir. Daha yüksek bantlarda emilim daha fazla düşürülebilir fakat bu sefer toplam yol kaybı artacak ve tasarlanacak algılayıcı daha da karmaşık hale gelecektir. Doğal gaz ortamında ise hava ortamında olduğu gibi 0.01 THz – 0.5 THz aralığı kullanılabilceği Şekil 8' de gösterilmiştir. Sonuç olarak bu araştırmanın, teorik ve pratik olarak THz dalgaları ile çalışacak olan araştırmacılara bir kılavuz niteliğindedir.

Kaynaklar

Akkaş, Mustafa Alper, 2017, Channel Modeling of Wireless Sensor Networks in Oil, *Wireless Personal Communications*, 1-10. DOI: 10.1007/s11277-017-4083-9, ISSN: 0929-6212 (Print) 1572-834X (Online)

Akkaş, Mustafa Alper, 2017, Terahertz Wireless Data Communication, *Wireless Networks*, <https://doi.org/10.1007/s11276-017-1548->

Atakan B, Ozgur BA., 2007 An information theoretical approach for molecular communication. *Bio-Inspired*

Models of Network, Information and Computing Systems, 2007. Bionetics 2007. 2nd. IEEE.

Blalock JE., 1989. A molecular basis for bidirectional communication between the immune and neuroendocrine systems. *Physiological reviews* 69.1, 1-32.

Borghino D., (March 31, 2015). 3D flash technology moves forward with 10 TB SSDs and the first 48-layer memory cells. *Gizmag*. Retrieved March 2015.

Burke PJ., 2004. Carbon nanotube devices for GHz to THz applications. *Optics East*. International Society for Optics and Photonics.

Colthup N., 2012, Introduction to infrared and Raman spectroscopy. Elsevier.

Dixon RA, LAMB CJ., 1990 Molecular communication in interactions between plants and microbial pathogens. *Annual review of plant biology*, 41.1, 339-367.

E. Hack, L. Valzania, G. Gäumann, M. Shalaby, C.P. Hauri, P. Zolliker, 2016, Comparison of thermal detector arrays for Off-Axis THz holography and real-time THz imaging, *Sensors*, 16, p. 221

Feynman RP. , 1992. There's plenty of room at the bottom [data storage]. *Microelectromechanical Systems, Journal of* 1.1, 60-66.

Friis HT., 1946 A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE* 34.5, 254-256.

Grbovic D, Karunasiri G. , 2009. Fabrication of Bi-material MEMS detector arrays for THz imaging. *SPIE Defense, Security, and Sensing*. International Society for Optics and Photonics.

Hiyama S, Moritani Y, Suda T, Egashira R, Enomoto A, Moore M, Nakano TZ , 2006. Molecular communication. *Journal-Institute of Electronics Information and Communication Engineers*, 89.2, 162.

J.S. Wilzewski, I.E. Gordon, R.V. Kochanov, C. Hill, L.S. Rothman, 2016, H₂, He, and CO₂ line-broadening coefficients, pressure shifts and temperature-dependence exponents for the HITRAN database. Part 1: SO₂, NH₃, HF, HCl, OCS and C₂H₂, *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 168, pp. 193-206, 10.1016/j.jqsrt.2015.09.003

- Jepsen PU, David GC, Martin K. , 2011. Terahertz spectroscopy and imaging—Modern techniques and applications. *Laser & Photonics Reviews* 5.1, 124-166.
- Jornet JM, Ian FA., 2013. Graphene-based plasmonic nano-antenna for terahertz band communication in nanonetworks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 31.12 , 685-694.
- Kuran HS, Moritani Y., 2010 Molecular communication: Harnessing biochemical materials to engineer biomimetic communication system, *Nano Communication Networks (Elsevier)*, 1 (2) 20–30.
- Liu HB, Zhong H, Karpowicz N, Chen Y, Zhang XC., 2007 Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications . *Proceedings of the IEEE* 95.8, 1514-1527.
- Llatser I, Kremers C, Cabellos-Aparicio A, Jornet JM, Alarcón E, Chigrin DN., 2012. Graphene-based nano-patch antenna for terahertz radiation. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications* 10.4, 353-358.
- Luukanen A, Hadfield RH, Miller A J, Grossman EN., 2004. A superconducting antenna-coupled microbolometer for THz applications. *Defense and Security*. International Society for Optics and Photonics.
- Mittleman DM, Gupta M, Neelamani R, Baraniuk RG, Rudd JV, Koch M., 1999. Recent advances in terahertz imaging. *Applied Physics B* 68.6, 1085-1094.
- Naumann D, Dieter H, Harald L., 1991 Microbiological characterizations by FT-IR spectroscopy. *Nature* 351.6321,81-82.
- Nazli H, Bicak E, Türetken B, Sezgin M., 2010 An improved design of planar elliptical dipole antenna for UWB applications. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE* 9, 264-267.
- Pawar AY, Sonawane DD, Erande KB, Derle DV., 2013. Terahertz technology and its applications . *Drug Invention Today* 5.2, 157-163.
- Rothman LS, Gordon IE, Barbe A, Benner DC, Bernath PF, Birk M, Chance K., 2009, The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 110.9, 533-572.
- Shilov A., 2008. Samsung Unveils 2GB Flash Memory Chip. *X-bit labs.*
- T. Nagatsuma, G. Ducournau, and C. C. Renaud, 2016, Advances in terahertz communications accelerated by photonics, *Nat. Photonics* 10(6), 371–379 .
- Wang CX, Haider F, Gao X, You XH, Yang Y, Yuan D, Hepsaydir E., 2014, Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *Communications Magazine, IEEE* 52.2, 122-130.