

LNG ORTAMINDA ÇALIŞAN TELSİZ DUYARGA AĞLARI İÇİN GİGAHERTZ KANAL MODELLENMESİ

*Mustafa Alper AKKAŞ**

Alınma: 13.10.2016; düzeltme: 09.06.2017; kabul: 11.06.2017

Öz: LNG (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz) doğal gazın $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de soğutulması ile oluşturulan temiz, renksiz ve zehirsiz bir sıvıdır. Bu soğutma işlemi sayesinde doğal gazın hacmi 600 kat daha küçültülerek, LNG'nin depolanmasını ve taşınmasını kolaylaştırmaktadır. LNG' nin özgül ağırlığı basınç, sıcaklık ve karışıma göre değişir ve ortalama $1,0\text{ kg/litre}$ su ile mukayese edildiğinde, $0,46\text{ kg/litre}$ 'ye eşittir. LNG'nin özgül ağırlığının düşük olması elektromanyetik dalgaların yayılımı ve TDA (Telsiz Duyarga Ağları)'nın haberleşebilmesi için bir avantajdır. Ayrıca bu çalışmada TDA'lar için LNG yol kaybı, yansıma etkisi ve BHO (Bit Hata Oranı)'a ya göre LNG ortamı analiz edilip, modellenmiştir. Yayılım karakteristikleri teorik yaklaşım ile incelenmiştir. Teorik analizler ve simülasyon sonuçları $10\text{ GHz} - 13\text{ GHz}$ bant aralığında, 10 metre civarı bir kablosuz haberleşme olacağını ispatlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: LNG, Telsiz Duyarga Ağları, Elektromanyetik Modelleme.

Gigahertz Channel Modeling for Wireless Sensor Networks Operating in LNG Environment

Abstract: LNG (Liquefied Natural Gas) is a clear, colorless and non-toxic liquid which forms when natural gas is cooled to $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. The cooling process shrinks the volume of the gas 600 times, by this way making LNG easier and safer to store and ship. The density of LNG is around 0.46 kg/liter , depending on pressure, temperature, and composition, compared to water at 1.0 kg/liter . The lesser density of LNG is also an advantage for the propagation of the electromagnetic waves and communication of WSN (Wireless Sensor Networks) in LNG medium. Then here in this work LNG has analyzed according to path loss, multipath effect and providing an evaluation about the Bit Error Rate (BER) of the modelled channel depending on the LNG medium for WSNs. The propagation characteristics are investigated using a theoretical approach. The theoretical analysis and the simulation results prove the feasibility of wireless communication about 10 m range in the $10\text{ GHz} - 13\text{ GHz}$ band range in LNG medium.

Keywords: LNG, Wireless Sensor Networks, Electromagnetic Modelling.

1. GİRİŞ

LNG (Liquified Natural Gas- Sıvılaştırılmış Doğal Gaz) sıvı fazında taşınabilen ve depolanabilen kokusuz, renksiz ve ön önemlisi zehirli olmayan, sıvı fazda bir yakıttır. LNG, doğal gazın atmosfer basıncında $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'a kadar soğutulup yoğunlaştırılmasıyla elde edilir. LNG'nin bu sayede hacmi yaklaşık 600 kat küçültülerek sıvı halde taşınması sağlanır. LNG'nin doğal gaza göre taşıma maliyetleri düşük ve basittir. Kamyon, gemi gibi taşıma araçları ile bu sayede rahat bir şekilde taşınır. Tüketimde ise tekrar gaz fazına sokulmaktadır. LNG'nin doğal gaza göre bir başka avantajı ise doğal gazın sıvılaştırılması basamağında bünyesindeki ağır hidrokarbonlardan arındırılmasıdır. Bu sayede doğal gaz daha yüksek enerjiye sahip olur ve daha temiz bir salınım sağlar. LNG' nin sıvı fazının özgül ağırlığı $0,46$ 'dır. Yani ağırlığı, suyun yaklaşık yarısıdır. Geometrik hacmi 1 m^3 (1.000 lt) olan bir kaba doldurulan LNG'nin ağırlığı 460 kg 'dır. LNG ulaşımı zor olan ve doğal gaz boru hatlarının döşenemediği konumlara ilgili

* Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 14280, Bolu, Türkiye
İletişim Yazarı: Mustafa Alper Akkaş (alperakkas@ibu.edu.tr)

standart, talimat ve yönetmelikleri sağlaması durumunda kolaylıkla taşınabilmektedir. Ayrıca Türkiye’de de değişen komşu ülkelerle ilişkilere göre, Katar gibi sınır komşusu olmayan ülkelerden LNG alımı gündeme gelebilmektedir. LNG sıcak su ve kızgın su, buhar, sıcak hava, kızgın yağ elde etmek için kullanılır. Ayrıca pişirme ve kurutma fırınlarında, metal işleme, seramik ve cam sanayi, elektrik üretimi amacıyla da LNG kullanılmaktadır. LNG’nin sıcaklığı, oda sıcaklığında depolandığında -150°C civarındadır. LNG 0 ila 5 bar arasında değişen basınçlarla depolanır ve iletilir. LNG aşırı soğuk şartlarda depo edilmeli ve iletilmelidir. Buharlaştırıcılar LNG’yi tüketime hazır hale yani gaz fazına çeviren ekipmanlardır. Buharlaştırıcılar bakım gerektirmez çünkü hareketli parçaları yoktur ve alüminyumdan üretilirler (Remelje ve Hoadley, 2006), (Zednik ve diğ., 2000).

Bu çalışmada, LNG ortamında TDA’lar da EM dalgaları kullanılarak haberleşme menzili hesaplanmıştır. Teorik hesaplamalar incelendiğinde, iki düğüm arasındaki mesafenin 10 metreye çıkabildiğini göstermiştir. Bu çalışmada 10 GHz – 13 GHz aralığı seçilmiştir. 10 GHz – 13 GHz aralığı seçilmesinin en büyük sebebi ise anten boyutunu küçültmek istenmesidir. Uygulamanın sadece LNG’nin depo edildiği büyük tanklarda değil aynı zamanda LNG’nin taşındığı küçük borulara da duyurga ağı yerleştirilmesini amaçlamaktadır. 10 GHz – 13 GHz aralığı tam dalga modülasyonu yapılsa bile, anten boyutu maksimum 2,5 cm civarında olmaktadır. Bu boyut uygulanacak modülasyona göre dörtte birine kadar düşürülebilir. Bu çalışmanın literatüre katkısı şöyle özetlenebilir: TDA’lar LNG ortamında haberleşebilir ve haberleşme menzili uygulama açısından yeterlidir. Ayrıca TDA’ların anlık veri izleme gibi avantajları yanı sıra, LNG gibi özgül ağırlığı düşük bir sıvının, riskli ortamlarda kullanılması da güvenlik açısından büyük katkı sağlayacaktır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde LNG ortamında TDA’lar modellenmemiştir fakat farklı ortamların elektromanyetik modellenmesi literatürde mevcuttur. Bunlardan bazıları şu şekilde özetlenebilir:

Toprak ortamını elektromanyetik dalga tabanlı inceleyen çalışmalar (Vuran ve Akyildiz, 2010), (Akyildiz ve diğ., 2009b)’dir. Bu çalışmalarda ise TDYA (Telsiz Duyurga Yeraltı Ağları)’da iletişim incelenmiştir. Bunlar havadan havaya, topraktan toprağa, topraktan havaya ve havadan toprağa olarak değişmektedir. (Agnelo, 2010) yüksek lisans tezinde, toprak ortamında EM dalgalarının 300 MHz ve 1.3 GHz bant aralığının TDYA’larının toprak ortamı için yol kaybını ve BHO’ları incelemiş ve geçiş penceresi araştırmıştır.

THz bantlarında, benzer çalışmalardan bir tanesi ise (Akyildiz ve Jornet, 2010), (Jornet ve Akyildiz, 2013) çalışmasıdır. Bu çalışmada 0,1 THz ile 10 THz bant aralığı incelenerek, bu aralığın vücut içi haberleşme tekniklerinde nasıl kullanılabilceği araştırılmıştır. Çalışmada THz bantlarının birçok uygulamalarda kullanabileceği teorik olarak gösterilmiş ve elektromanyetik dalgaların vücut içersinde nasıl modellenebileceği anlatılmıştır. Bu uygulamalardan başlıcası vücut içi haberleşmedir. Vücut içi haberleşmede, nano boyutunda telsiz duyurgalar vücut içine çeşitli yollarla gönderilerek, vücudun hastalıklara karşı tedavisinde kablosuz nano teknoloji kullanımı hedeflenmektedir.

(Elrashidi ve diğ., 2012)’de su ortamında yeraltı duyurga ağlarının davranışları 2,4 GHz’ de incelenmiştir. (Akkaş ve Sokullu, 2015) ise yine su ortamını 300 ile 700 MHz bantları arasındaki soğurma özellikleri, grafik sonuçlarının daha az yol kaybına neden olduğunu, bu sebepten dolayı ise daha çok iletişim mesafesine sahip olduğunu göstermiştir. (Elrashidi ve diğ., 2012) çalışmalarında, 2,5 GHz 100 dB’lik bir kayıpta, iletişim mesafesi 1 metre civarındayken, (Akkaş ve Sokullu, 2015) çalışmasında iletişim mesafesi 300 MHz’de ve 100 dB’lik bir kayıpta, 5 metreyi geçmektedir.

3. TELSİZ DUYURGA AĞLARI

Telsiz Duyurga Ağlarının (TDA) uygulama alanları ve önemi her geçen gün artmakta ve farklı dallara ayrılmaktadır. İnsanın ulaşamayacağı yerlerde, çevre şartlarının incelenmesi,

yeraltı hareketliliğin incelenmesi, deniz ve okyanusların hareketlerinin ve su ortamının incelenmesi, orman yangınlarının önceden haber verilmesi, savunmada, sanayide, hareketli nesne takibinde, doğa izlemede vb. gibi birçok yararlı uygulama alanları olan TDA'ların verimli tasarlanması, yaygınlaşmasını da beraberinde getirmiştir. TDA'larda kullanılan düğüm noktalarının, enerji, işlem kapasitesi ve hafıza kısıtlamalarının olması, kablolu ve diğer kablosuz ağlarda kullanılanlardan daha farklı bir tasarım yönteminin belirlenmesini ihtiyaç göstermektedir ki bu tasarım TDA'lara has olmalıdır. TDA'ların alanda giderek daha çok kullanılması nedeniyle, daha verimli tasarlanması, birçok alanda daha uzun ömürlü, daha performanslı, ekonomik yönden daha hesaplı duyuruların kurulmasına imkân verecektir.

TDA'ların kullanım alanları gün geçtikçe daha kapsamlı olarak gelişmektedir. Son yıllarda TDA'ların Terahertz (THz) teknolojisinin ve MEMS (Mikro Elektrik-Mekanik Sistemler) teknolojisinin gelişmesi sayesinde, vücut içi haberleşmede de kullanılması hedeflenmektedir. Frekans değeri arttıkça anten boyutu küçülür fakat yol kaybı azalır. Elektromanyetik (EM) Dalgalar yayılırken meydana gelen kayba ise serbest uzay yol kaybı denilir. Herhangi bir uygulamaya göre, TDA tasarlanırken uygulama yapılacak bölgeye göre TDA'nın boyutu ve kullandığı frekans değişir. TDA'nın boyutunu etkileyen önemli etmenlerden biri ise antendir. Örneğin vücut içi haberleşmede, THz dalgalarının seçilmesinin en büyük sebebi anten boyutunun nano boyutlara indirilebilmesidir. Bu uygulamada TDA daha küçük boyutta üretilmesini sağlayacak GHz mertebesinde TDA'ların kullanabilmesi için EM dalgaları modellenmelidir. Giriş kısmında da bahsedildiği gibi LNG'nin sıvı fazının özgül ağırlığı 0,46'dır. Yani ağırlığı suyun yaklaşık yarısıdır. Geometrik hacmi 1 m³ (1.000 lt) olan bir kaba doldurulan LNG' nin ağırlığı 460 kg'dır. Özgül ağırlığın azalması, EM dalgaların yayılımını kolaylaştırır. Özgül ağırlık ve emilim arasındaki ilişki, Beer-Lambert kanunundan ispatlanabilir. Beer-Lambert kanunu denklem 1 şeklinde gösterilir (Akkaş ve diğ., 2012a) :

$$Soğurma = \log \frac{I_0}{I} = \varepsilon C l \quad (1)$$

Bu formülde I_0/I gelen ve yansıyan ışığın yoğunluğudur. ε ise emilim katsayısıdır. C yoğunluk, l ise optik mesafedir. Formülden de anlaşıldığı gibi C yoğunluk ile soğurma doğru orantılıdır (Gutierrez ve Vincent, 2012b). LNG'nin sıvı fazında özgül ağırlığının çok düşük olması, TDA'ların iletişim mesafesi için bir avantajdır.

Makalenin 1. bölümde LNG hakkında kısa bir bilgi verdikten sonra yapılan çalışmalar özetlenmiştir. 2. bölümde LNG'nin nasıl matematiksel modellendiği anlatılmış, 3. bölümde ise yansımaların matematiksel modeli nasıl etkilediği analiz edilmiştir. 4. bölümde elde edilen matematiksel modelin grafiksel sonuçları verilmiştir. Son ve 5. bölümde ise sonuçlar yorumlanmıştır.

4. LNG'NİN ELEKTROMANYETİK ANALİZİ

Herhangi bir ortamda EM dalgaların yayılımında başlangıç denklemi Friis denklemdir. Denklem 2'de Friis denklemi gösterilmiştir.

$$G_A (dBm) = G_V (dBm) + \underbrace{K_V (dB) + K_A (dB)}_{\text{Toplam Kazanç}} - \underbrace{YK_{Boş Alan} (dB)}_{\text{Kayıp}} \quad (2)$$

Denklem 2'de G_V verici antenin taşıma gücü, K_V ve K_A verici ve alıcı antenlerin kazancıdır. G_V , K_V ve K_A sistem için kazançtır. Bu büyüklüklerin haberleşme sisteminde değerlerinin yüksek

olması, iletişim mesafesi ve sistemin verimliliği açısından çok önemlidir. Diğer bir önemli husus ise sistemin kayıplarını oldukça düşük değerlere çekmektir. $K_{Boş Alan}$ kaybı temel Friis denkleminde yer alır ve $20\log_{10}(d)+20\log_{10}(f)+92,45$ 'e eşittir, birimi ise dB' dir. d 'nin birimi km, f ise bu çalışmada kullanılan GHz'dir. 92,45 katsayısı birimlere göre değişiklik gösterir. Fakat farklı ortamlarda EM dalgalar yayılırken sadece boş alan yol kaybına maruz kalmazlar, farklı ortamlardan da geçerler (Mao ve diğ., 2007a). Örneğin bu çalışmada boş alan yol kaybına ek olarak, LNG ortamına EM dalgalar maruz kalmaktadır. Bu kayıplar ise Denklem 3'de gösterilmiştir.

$$K_{LNG} = K_{\beta} + K_{\alpha}$$

$$K_{\beta} = 20\log\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right) = 154 - 20\log(f) + 20\log(\beta) \quad (3)$$

$$K_{\alpha} = 8,69\alpha d$$

K_{β} LNG ortamında ki zayıflama kaybıdır. K_{β} ortamın farklı dalga boyları sinyalleri nedeniyle oluşur. Ortamın dalga boyu $\lambda=2\pi/\beta$ 'e eşittir. Boş alan yol kaybı ise $\lambda_0=c/f$ 'dir. Bunların birbirlerine orantısı K_{β} 'i verir. β faz kayma sabitini, c ise ışık hızı olan $3*10^8$ m/s'dir. Bunun dışında diğer bir zayıflama nedeni ise ortamdan dolayı gerçekleşir. Ortamın zayıflama büyüklüğü K_{α} ' ya bağlıdır. α zayıflama sabitinden kaynaklanan iletim kaybıdır (Li ve diğ., 2007b).

Tüm kazanç ve kayıplar bir arada değerlendirildiğinde, LNG ortamındaki genel kayıp denklemi, denklem 4 şeklinde değişir.

$$K_{LNG} = 6,4 + 20\log(d) + 20\log(\beta) + 8,69\alpha d \quad (4)$$

Denklem 4'deki α zayıflama sabiti ve β faz kayma sabitinin açılımları denklem 5'de gösterilmiştir. α zayıflama sabitinin birimi 1/m ve β faz kayma sabitinin birimi ise radyan/metredir (Vuran ve Akyıldız, 2008a).

$$\alpha = 2\pi f \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2} \left[1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2 - 1 \right]}$$

$$\beta = 2\pi f \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2} \left[1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2 + 1 \right]} \quad (5)$$

ϵ' ve ϵ'' LNG'nin bağlı dielektrik sabitinin gerçek ve hayali parçalarıdır. μ manyetik geçirgenliktir. Bu çalışmada ϵ' ve ϵ'' değerleri (Paillou ve diğ., 2008b)'den alınmıştır. Sonuç olarak LNG ortamında EM dalgaların emilimi denklem 6 şeklinde gösterilir.

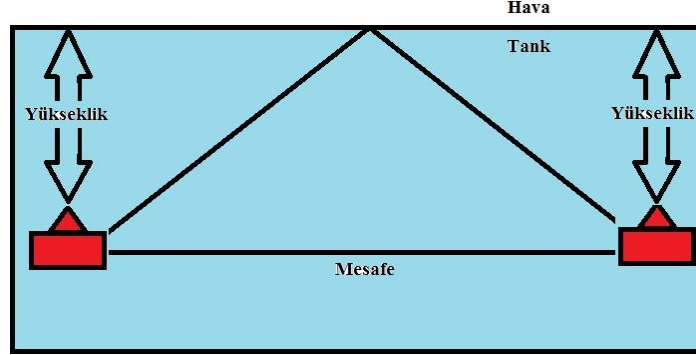
$$K_{EM} = \underbrace{20 \cdot 10 \log_{10} \cdot 10(4\pi \cdot f \cdot d / c)}_{K_{yayılım}}$$

$$+ \underbrace{6,4 + 20\log(d) + 20\log(\beta) + 8,69\alpha d}_{K_{LNG} [dB]} \quad (6)$$

4.1 Yansıma Etkisi

Lozem LNG belli teknik şartları yerine getiren kriyojenik, yani -100 °C ye kadar dayanıklı tanklarla taşınabilir bir bileşiktir. Tanklar vakum uygulanmış çift cidarlı ve izolasyonludur. EM dalgalar tek yönlü bir dağılım gerçekleştirmezler, tank ve boru yüzeylerinden çarpıp geri dönen dalgalarda emilimi etkilerler. Denklem 5, tek yönlü bir iletişimi incelemektedir. Şekil 1' de,

sadece mesafe eğrisi kısmındaki dalgalar gösterilmektedir. Bu bölümde ise yansımadan gelen dalgaların sisteme nasıl etki ettiği incelenmektedir.



Şekil 1:
Tank içi yansımaya

κ İkinci yansımadan kaynaklanan zayıflama katsayısı olan V , denklem 7 şeklinde ifade edilir. Denklem 7'deki Γ yansımaya katsayısının genliği, ϕ ise yansımaya katsayısının fazıdır. Δr basit Pisagor bağlantısı temel alınarak elde edilen $((d^2/4+h^2))^{1/2}-d$ ye eşittir.

$$V^2(d_{sand}) = 1 + (\Gamma \cdot \exp(-\alpha\Delta r))^2 - 2\Gamma \exp(-\alpha\Delta r)^2 \times \cos(\pi - (\phi - \frac{2\pi f}{c\sqrt{\epsilon'}} \Delta r)) \quad (7)$$

Yansımalarından etkilenen yeni yayılım denklemi ise denklem 8 de gösterilmiştir (Silva ve Vuran, 2009a) .

$$LNG2^{(d)} = K_{LNG}^{(d)} - 10 \log V(d, h_u) \quad (8)$$

Tank içinde ki telsiz duyurga ağlarının iletim gücüne $G_{iç}$ denilirse, dışarıda duran telsiz duyurga ağlarına giden güç, $G_{dış}$ şeklinde denklem 9' da gösterilebilir. K_v ve K_A aynı şekilde verici ve alıcı antenlerin kazancıdır.

$$G_{dış} = G_{iç} + K_v + K_A - K_{LN2} \quad (9)$$

Sonuç olarak LNG ortamında iletişim mesafesi denklem 10 olarak gösterilir.

$$R_{UG-UG} = \max \left\{ d : K_{LNG2} / G_n > BHO \right\} \quad (10)$$

G_n gürültünün gücünü, BHO ise alıcı düğüm tarafından ihtiyaç duyulan minimum sinyal gürültü oranını simgeler (Vuran ve Akyildiz, 2010)

Tek yönlü iletişimde sinyalin zarfı, X_i , $i \in \{1,2\}$ şeklinde tanımlanırsa, bit başına düşen güç spektral yoğunluğu $r = X^2 \times (E_b/N_0)$ olarak tanımlanır. Bu denklemin dağılım formülü ise aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$f(r) = \frac{1}{r_0} \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right) \quad (11)$$

Denklem 11'de, r_0 'ın eşitliği denklem 12'de gösterilmiştir.

$$r_0 = E \left[X^2 \right]_{SGO} \quad (12)$$

Çift yönlü iletişimde ise X parametresi (Cheng, 1989) makalesindeki elektrik alan formülünden bulunarak elde edilir.

$$X^2 = X_1^2 + \left(X_2 \cdot \Gamma \cdot \exp(-\alpha\Delta(r)) \right)^2 - 2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \Gamma \cdot \exp(-\alpha\Delta(r)) \times \cos \left(\pi - \left(\phi - \frac{2\pi}{\lambda} \Delta(r) \right) \right) \quad (13)$$

Denklem 13' de X_1 ve X_2 çift yönlü iletişimde iki bağımsız, rastgele değişkenlerdir. Değişkenlerin adları denklem 7 ile aynıdır (Vuran ve Akyildiz, 2010), (Akyildiz ve diğ., 2009b).

Sistemin BHO (Bit Hata Oranı)'sunu hesaplamak için, iletişim mesafesi en uzun olan ve gürültüden en az etkilenen modülasyon türü ikili faz kaydırmalı anahtarlama modülasyon türü seçilip, denklem 14'de sisteme uygulanmıştır.

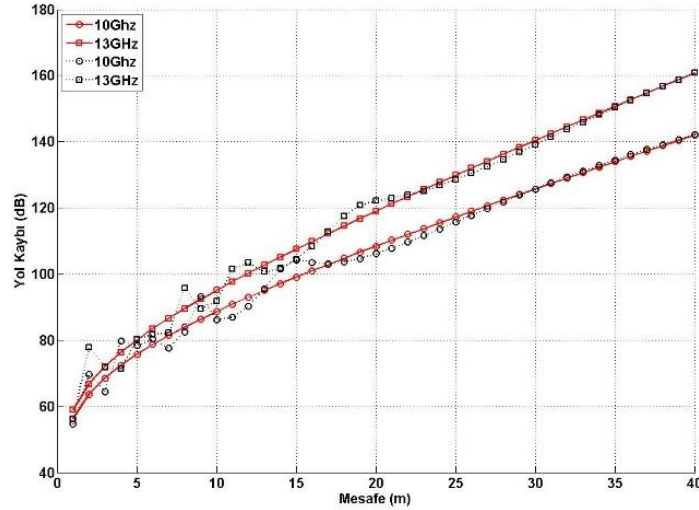
$$BHO = 0.5 \operatorname{erfc}(\sqrt{SGO}) \quad (14)$$

Denklem 14' de $\operatorname{erfc}(\cdot)$ hata fonksiyon, SGO ise sinyal gürültü oranıdır.

$$SGO = P_t - L_f - P_n \quad (15)$$

Denklem 15'de, P_t iletim gücü, L_f toplam yol kaybı, P_n ise gürültünün enerjisidir. Yapılan hesaplarda, P_t iletim gücü 10-30 dBm arasında değişmektedir. P_n ise ortalama -100 dBm varsayılmıştır (Vuran ve Akyildiz, 2010), (Akyildiz ve diğ., 2009b).

5. GRAFİKSEL SONUÇLAR

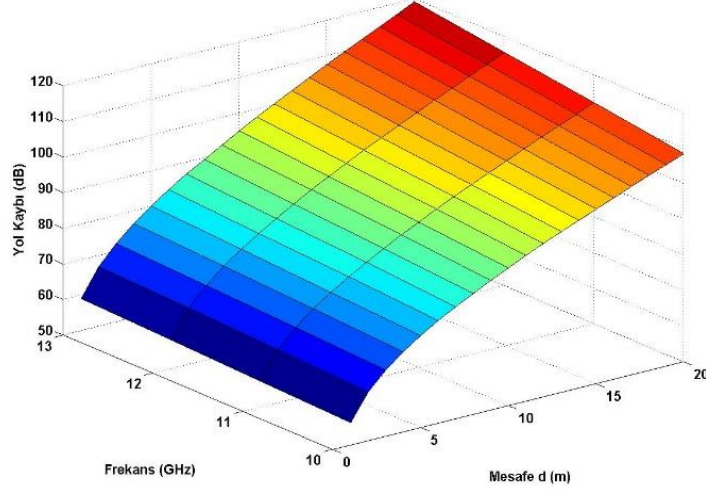


Şekil 2:

Tek ve çift yönlü iletişimde mesafeye göre yol kaybı

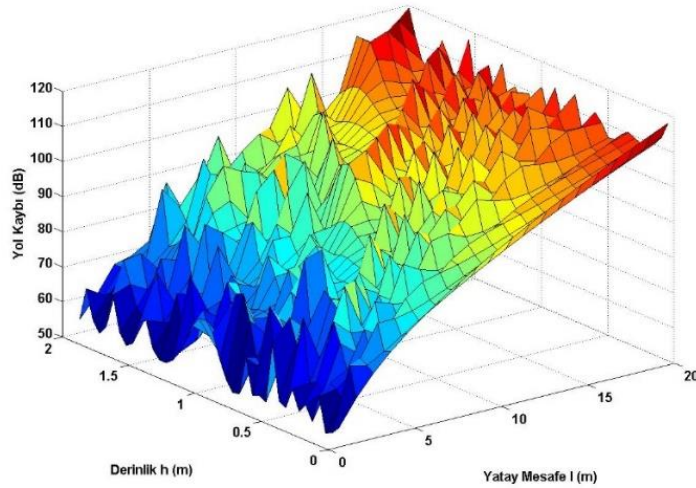
Şekil 2'de siyah ve noktalı çizgi ile gösterilen eğriler çift yönlü iletişimdiki, kırmızı ve sürekli çizgi ile gösterilen eğriler ise tek yönlü iletişimdiki yol kaybını göstermektedir. Şekil 1'den de anlaşılacağı gibi yansımaların genel olarak sisteme etkisi dalgalanma şeklindedir. Bu dalgalanma 25 m'nin altında daha çok hissedilmektedir. 25 m'den sonra ise neredeyse tek yönlü iletişim ile aynı olmaktadır. Bunun sebebinin ise belli bir mesafeden sonra yansılardan gelen

dalgaların gücünün azalması olarak söylenebilir. LNG ortamının özgül ağırlığının düşük olması, iletişim mesafesini arttırmıştır. 100 dB'lik bir sistem tasarlandığı düşünüldüğünde, iki düğüm arasında ortalama 10 m iletişim mesafesi söz konusudur.



Şekil 3:
Tek yönlü iletişimde mesafe ve frekansa göre yol kaybı

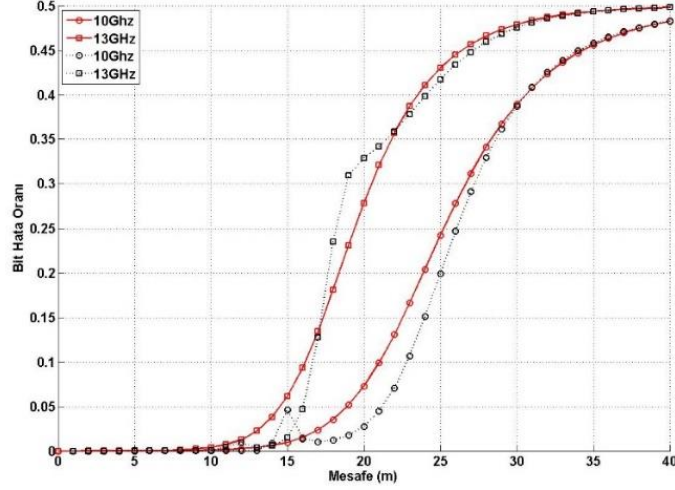
Şekil 3'de ise tek yönlü iletişimin 10 GHz – 13 GHz arasında mesafeye göre yol kaybı görülmektedir. Şekil 2'ye göre daha detaylı görülen bu grafikte yine 100 dB'lik bir sistem ele alınırsa, sarı bölge iletişim mesafesini göstermektedir. Sarı bölge dikkate alındığında, frekans azaldıkça iletişim mesafesi artmaktadır. Fakat frekansın artması anten boyutunu da arttırmaktadır.



Şekil 4:
Çift yönlü iletişimde mesafe ve frekansa göre yol kaybı

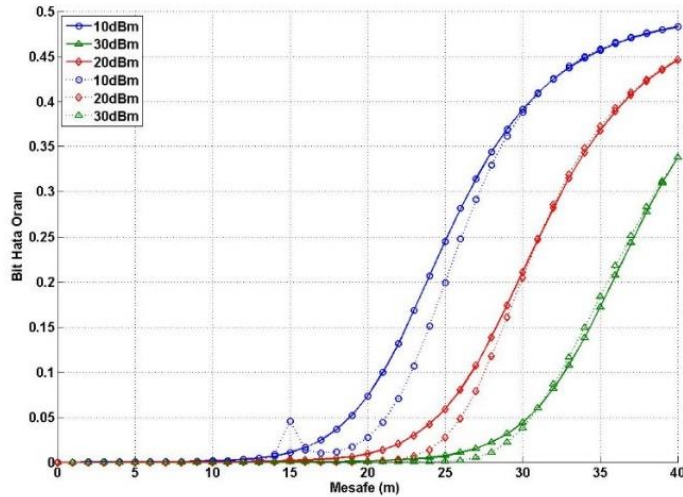
Şekil 4'de ise çift yönlü iletişimin yatay mesafeye ve derinliğe göre yol kaybı görülmektedir. Şekil 2'ye göre daha detaylı görülen bu grafikte yine 100 dB'lik bir sistem ele alınırsa, sarı bölge iletişim mesafesini göstermektedir. Dalganmalar yatay mesafe azaldıkça ve

derinlik arttıkça, artmaktadır. Fakat Şekil 2'nin detaylı halini gösteren Şekil 4, dalgalanmalarda olsa ortalama yol kaybını fazla etkilememektedir.



Şekil 5:
Tek ve çift yönlü iletişimde mesafe ve frekansa göre BHO

Şekil 5, tek ve çift yönlü iletişimde mesafe ve frekansa göre BHO'ları vermektedir. Siyah ve noktalı çizgi ile gösterilen eğriler çift yönlü iletişimdeki, kırmızı ve sürekli çizgi ile gösterilen eğriler ise tek yönlü iletişimdeki yol kaybını göstermektedir. Çift yönlü iletişimde dalgalanmalar görülmektedir ama temel olarak tek yönlü iletişim etrafında bir değer sergilemektedir. Frekans azaldıkça, dalgalanmalar kendini daha çok belli etmektedir. Bunun sebebi ise frekans azaldıkça yan dalgalardan gelen sinyaller daha güçlü olmaktadır. BHO'ları Şekil 2 ile orantılı bir şekilde değişmektedir. Örneğin 25 m'den sonra tek yönlü iletişim ve çift yönlü iletişim birbirlerine çok yakındır.



Şekil 6:
Tek ve çift yönlü iletişimde mesafeye ve iletim gücüne göre BHO

Şekil 5' de ise tek ve çift yönlü iletişimde mesafeye ve iletim gücüne göre BHO'larını vermektedir. Kesik çizgi ile gösterilen eğriler çift yönlü iletişimi, düz çizgi ile gösterilen eğriler

ise tek yönlü iletişimi göstermektedir. İletim gücü arttıkça çift yönlü iletişim eğrileri tek yönlü iletişim eğrilerine yaklaşmaktadır. Bunun en büyük sebebi ise güç arttıkça direk alınan dalgalar baskın olmaktadır. Alınan güç azaldıkça, dalgalanmalar kendini daha çok belli etmektedir. Bunun sebebi ise tek yönlü iletimin zayıf kalması ve yansıma sinyallerinden etkilenmesidir.

6. SONUÇ

Sonuç olarak bu çalışmada, LNG ortamında TDA'lar nasıl haberleşir, EM dalgalar nasıl yayılır gibi durumlar incelenmiştir. EM dalgaların, özellikle özgül ağırlığı düşük olan sıvılarda, daha uzun mesafeleri kat edebildikleri gösterilmiştir. EM dalgalarının, LNG gibi özgül ağırlığı düşük ortamlarda daha uzak mesafelere yayılması, TDA'ların da bu ortamlarda kullanımını kolaylaştırmaktadır. Grafikselsel sonuçlar incelendiğinde ise iki düğüm arasındaki iletişim mesafesi 10 metreye kadar çıkabilmektedir. Çalışmada 10 GHz – 13 GHz aralığı seçilmiştir. Bu aralığın seçilmesinin nedeni, LNG'nin sadece büyük tanklarda değil, aynı zamanda küçük borulardan da taşınmasıdır. 10 GHz – 13 GHz aralığı tam dalga modülasyonu yapılsa bile, anten boyutu maksimum 2,5 cm civarında olmaktadır. Bu boyut uygulanacak modülasyona göre dörtte birine kadar düşürülebilir. Sonuç olarak, TDA'lar LNG ortamında haberleşebilir. TDA'ların anlık veri izleme gibi avantajları, LNG gibi özgül ağırlığı düşük bir sıvının, riskli ortamlarda kullanılmasında güvenlik açısından da büyük katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada LNG ortamında, TDA'ların davranışları matematiksel olarak incelenmiştir. Gelecek çalışmalarda ise TDA'ların, LNG ortamında güvenli bir şekilde izole edilip, pratik olarak nasıl haberleşebildikleri incelenecektir.

KAYNAKLAR

1. Akkaş, M. A. ve Sokullu, R. (2015). Channel modeling and analysis for wireless underground sensor networks in water medium using electromagnetic waves in the 300–700 MHz range. *Wireless Personal Communications*, 84(2), 1449-1468.
2. Akkaş, M. A., Akyildiz, I. F. ve Sokullu, R. (2012, December). Terahertz channel modeling of underground sensor networks in oil reservoirs. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE* (pp. 543-548). IEEE. doi: 10.1109/GLOCOM.2012.6503169.
3. Akyildiz, I. F., & Jornet, J. M. (2010). Electromagnetic wireless nanosensor networks. *Nano Communication Networks*, 1(1), 3-19. doi: 10.1016/j.nancom.2010.04.001.
4. Akyildiz, I. F., Sun, Z. ve Vuran, M. C. (2009). Signal propagation techniques for wireless underground communication networks. *Physical Communication*, 2(3), 167-183. doi: 10.1016/j.phycom.2009.03.004.
5. Cheng, D. K. (1989). *Field and wave electromagnetics*. Pearson Education India.
6. Elrashidi, A., Elleithy, A., Albogame, M. ve Elleithy, K. (2012, March). Underwater wireless sensor network communication using electromagnetic waves at resonance frequency 2.4 GHz. In *Proceedings of the 15th Communications and Networking Simulation Symposium* (p. 13). Society for Computer Simulation International.
7. Gutierrez, G. ve Vincent, J. L. (Eds.). (2012). *Tissue oxygen utilization* (Vol. 12). Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-3-642-84169-9.
8. Jornet, J. M. ve Akyildiz, I. F. (2013). Fundamentals of electromagnetic nanonetworks in the terahertz band. *Foundations and Trends® in Networking*, 7(2-3), 77-233. doi: 10.1561/13000000045.
9. Li, L., Vuran, M. C. ve Akyildiz, I. F. (2007). Characteristics of underground channel for wireless underground sensor networks. *Proc. Med-Hoc-Net'07*.

10. Mao, G., Anderson, B. D. ve Fidan, B. (2007). Path loss exponent estimation for wireless sensor network localization. *Computer Networks*, 51(10), 2467-2483. doi: 10.1016/j.comnet.2006.11.007.
11. Paillou, P., Mitchell, K., Wall, S., Ruffié, G., Wood, C., Lorenz, R., ... & Encrenaz, P. (2008). Microwave dielectric constant of liquid hydrocarbons: Application to the depth estimation of Titan's lakes. *Geophysical Research Letters*, 35(5). doi: 10.1029/2007GL032515.
12. Remelje, C. W. ve Hoadley, A. F. A. (2006). An exergy analysis of small-scale liquefied natural gas (LNG) liquefaction processes. *Energy*, 31(12), 2005-2019. doi: 10.1016/j.energy.2005.09.005.
13. Silva, A. R. (2010). Channel characterization for wireless underground sensor networks.
14. Silva, A. R. ve Vuran, M. C. (2009, June). Empirical evaluation of wireless underground-to-underground communication in wireless underground sensor networks. In *International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems* (pp. 231-244). Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-02085-8_17.
15. Vuran, M. C. ve Akyildiz, I. F. (2008, April). Cross-layer packet size optimization for wireless terrestrial, underwater, and underground sensor networks. In *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE* (pp. 226-230). IEEE. doi: 10.1109/INFOCOM.2008.54.
16. Vuran, M. C. ve Akyildiz, I. F. (2010). Channel model and analysis for wireless underground sensor networks in soil medium. *Physical Communication*, 3(4), 245-254. doi: 10.1016/j.phycom.2010.07.001.
17. Zednik, J. J., Dunlavy, D. L. ve Scott, T. G. (2000). *U.S. Patent No. 6,089,022*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.