

Sualtı Akustik Haberleşme Sistemi Simülasyonu

Mehmet Boyalı, İbrahim Önder, Erhan K. Akyazı ve Salim Kahveci*

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
61080-Trabzon

*E-mail: salim@ktu.edu.tr

Özet: *Sualtı akustik haberleşme sistemleri alanında yapılan çalışmalar giderek artış göstermekte ve bu konu her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Sağladığı yararlar ve kullanım alanlarının da gelişmesi sebebiyle bu sistemlerin yetersizliğinin giderilmesi ve beklentilerin karşılanması gerekmektedir. Sualtı akustik haberleşme sistemleri alanında günümüze kadar yapılmış pek çok yabancı çalışma olmakla beraber bunların Türkiye'deki sayısı azımsanacak kadar az seviyededir. Ayrıca bu kaynakların kapsamlarının dar olduğu, teorik kaldığı ve görsel olarak pek fazla bilgi sunmadığı da ayrı bir durumdur. Sualtı akustik haberleşme sistemi simülasyonu başlığı altında yaptığımız bu çalışmada, haberleşmeyi etkileyen parametreler incelenerek performansa ne şekilde etki ettiği üzerinde durulmuştur.*

1. Giriş

Sualtı ortamında sesin, görünür ışık veya elektromanyetik enerjiye göre daha uzağa gidebildiği önceden beri bilinmekteydi. Sualtı akustiğiyle ilgili ilk ölçümler 1827 yılında İsviçreli fizikçi Daniel Colloden ve Fransız matematikçi Charles Sturm'un, su altında ses hızını ölçmek amacıyla, İsviçre'de Geneva Gölü'nde bu iki isim tarafından yapılmıştır [1]. Günümüzde; derinlik ölçme, deniz tabanının morfolojisinin çıkartılması, sismik stratigrafi, petrol ve doğal gaz araştırmaları, kabuk özellikleri ve kalınlığının belirlenmesi, mühendislik ve akustik uygulamalar, balık stoklarının bulunması gibi birçok çalışmada akustik yöntemler kullanılmaktadır. Sualtı akustik iletişim teknolojileri, deniz-aşırı petrol sanayisinde uzaktan kontrol, çevresel sistemlerde kirlilik gözlemlene, okyanus-altı istasyonlarda kaydedilen bilimsel verilerin toplanması, insansız sualtı araçları, dalgıçlar arasındaki konuşma iletişimi, cisim algılama-kurtarma için okyanus tabanının haritasının çıkarılması gibi uygulamalar için büyük bir önem arz etmektedir. Ses, esnek bir ortamın moleküllerinin düzenli hareketinden oluşur. Malzeme elastik olduğu için, malzeme parçacıklarının hareketi; hareket bir ses kaynağından çıktıktan sonra komşu parçacıklarla bağlantı kurmasıyla meydana gelir. Bir ses dalgası bu sebeple kaynaktan dışa doğru ses hızına eşdeğer bir hızla yayılım yapar ve bu yayılımın gerçekleşebilmesi için mutlaka katı, sıvı veya gaz gibi bir ortamın olması şarttır [2]. Sıvı içerisinde parçacık hareketi yayılma doğrultusuna paralel ve ileri geri şeklinde olur.

2. Su Altı Haberleşmesindeki Etkili Temel Parametreler

Su altı haberleşmesini etkileyen parametreleri şu şekilde sıralayabiliriz: Sıcaklık, Tuzluluk, Basınç, Yoğunluk, Derinlik, Sınırlarla etkileşme (su yüzeyi ve dip tabiatı), Hacimsel etkileşimler (su içerisindeki maddeler, baloncuklar, vb.), Verici ve alıcıların konumları, Ses kayıt ve mesafe tespiti (Sofar) ve Hareketlilik.

2.1. Akustik sinyal seviyesi

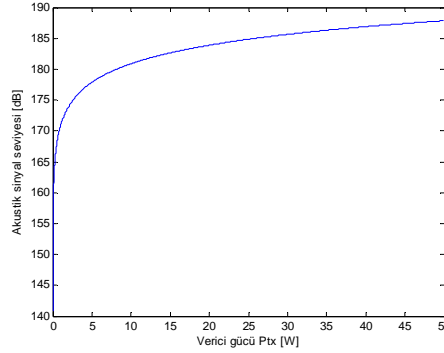
Projektör kaynak seviyesi, $SL_{projektor}$ genellikle akustik merkezine 1m referans mesafede ses basıncı seviyesi cinsinden tanımlanır. Bu referans mesafesinde kaynak yoğunluğu

$$I = \frac{P_{tx}}{Alan} (W / m^2) \quad (1)$$

şeklinde ve dB olarak 1 μPa 'da ölçülür, ancak "1 μPa basınç şiddeti nedeniyle yoğunluğu" anlamına gelir. Bir çok yönlü projektör yüzey alanı küredir ($4\pi r^2 = 12.6$). Böylece;

$$SL_{projektor} = 10 \log \left(\frac{(P_{tx} / 12.6)}{I_{ref}} \right) (dB) \quad (2)$$

olur. P_{tx} projektör ve referans dalga tarafından tüketilen toplam akustik güçtür. Akustik sinyal seviyesinin bu güce bağlı değişimi ise Şekil 1 ile gösterilmiştir.



Şekil 1. Verici gücüne bağlı akustik sinyal seviyesinin değişimi.

Burada gözlemlendiği gibi 1mW-5W aralığından düşük bir akustik sinyal seviyesinden yüksek bir akustik sinyal seviyesine sıçrama olurken (yaklaşık olarak 35dB) bu değerden sonra verici gücünü arttırmanın akustik sinyal seviyesinde çok fazla bir iyileştirme oluşturmadığı görülmektedir.

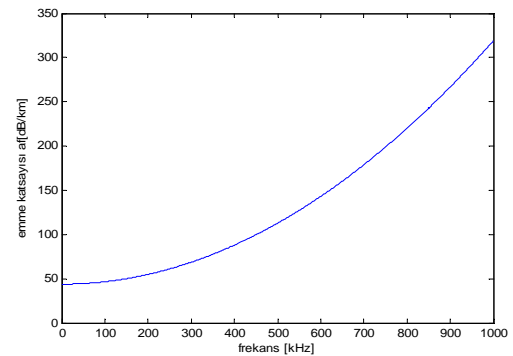
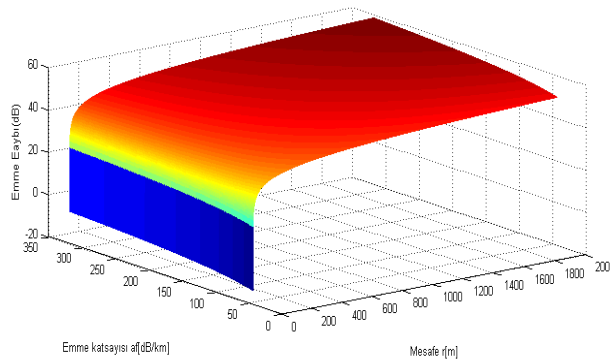
2.2. Emilim Kaybı

Emme enerji kaybı temsili bir akustik sinyal tarafından üretilen dalga olarak ortaya çıkan viskoz sürtünme ve iyonik rahatlatma nedeniyle ısı şeklinde dışarıya doğru yayılır ve bu kayıp aşağıdaki gibi mesafeye göre lineer olarak değişir,

$$PL_{emme}(r, f) = 10 \log(\alpha(f) \times r)(dB) \quad (3)$$

$$\alpha(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4}f^2 + 0.0033(dB/km) \quad (4)$$

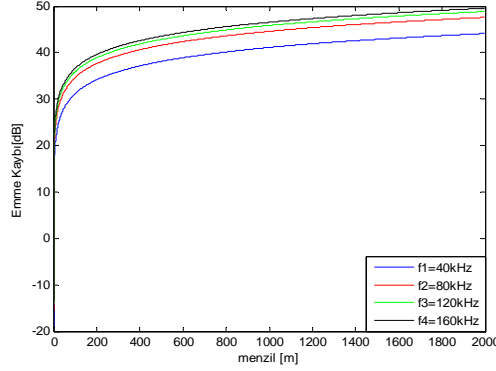
Burada r kilometre olarak mesafe ve α emme katsayısıdır. Genel olarak, emme katsayısı α ; artan frekans ile birlikte artar, derinlik arttıkça azalır ve denizde oldukça yüksektir. Son yarım yüzyıl boyunca emilim kayıpları ölçümleri çalışma frekansı, tuzluluk, sıcaklık, pH, derinlik ve ses hızını dikkate alan birkaç ampirik formüllere yol açmıştır. Bunlardan biri denklem (4)'teki Thorp'un ifadesidir [3]. 100Hz-1MHz frekans aralığı için geçerlidir ve %35 ppt tuzluluk, pH=8 ve 4°C sıcaklık ile deniz suyuna dayalı ve derinliği 0 m (atmosferik basınç) varsayılır. Emme kaybının mesafeye ve emme katsayısına bağlı ve emme katsayısının frekansa göre değişimi Şekil 2 ve Şekil 3'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 2. Emilim kaybının emme katsayısı ve mesafeye göre değişimi. Şekil 3. Frekansa bağlı emme katsayısı.

Şekil 2 üzerinden görülmektedir ki belli bir mesafeye kadar (0-200m arası) emilim kaybı oldukça yüksek bir artış göstermektedir. Daha sonraki mesafe artışlarında ise emilim kaybındaki artış daha düşük seviyede kalmıştır. Emilim kaybı su altı akustik haberleşme sistemlerinde etkin bir konuma sahiptir. Buna bağlı olarak kaybın düşük olması istenmektedir. Mesafe artışları emilim kaybını arttırmakta ancak 200m den sonraki artış miktarı daha düşük seviyelerdedir.

Emme katsayısı ile frekans arasında denklem (4)'de verildiği gibi genel olarak karesel bir ilişki söz konusudur. Uygulamada emme katsayısının düşük olması tercihimizdir. Ancak belli frekans bantlarının altında sağlıklı bir haberleşme kanalı sağlanamadığından bu katsayının düşük olabildiği ve haberleşmenin sağlandığı frekans aralıklarını tercih etmekteyiz. Bu katsayının artması emilim kaybını arttırmaktadır dolayısıyla emilim kaybının artması istenmeyen bir durum teşkil etmektedir. Şekil 3’de görüldüğü üzere 100- 400kHz’lik bir bant bölgesinde emme katsayısı artışı düşük seviyede kalmakta iken daha sonraki frekans artışlarında ise emme katsayısı daha hızlı bir artış göstermektedir. Sabit frekanslarda sabit bir emme katsayısı oluşacağından bu durumdaki emme kaybının mesafeye bağlı değişimi de Şekil 4’deki gibi olur.



Şekil 4. Belli frekanslarda mesafeye bağlı olarak emme kaybının değişimi.

AINSLIE & McCOLM modeline göre emme katsayısı aşağıdaki denklemlerle tanımlanmaktadır [4].

$$f_1 = 0.78 \sqrt{\frac{s}{35}} \times e^{\frac{T}{26}} \text{ ve } f_2 = 42 e^{\frac{T}{17}} \quad (5)$$

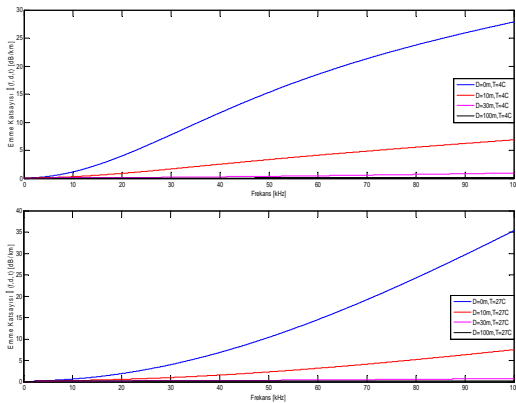
$$\alpha(f, d, t) = 0.106 \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} e^{\frac{pH-8}{0.56}} + 0.52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) \left(\frac{s}{35}\right) \left(\frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2}\right) e^{\frac{-D}{6}} + 4.9 \times 10^{-4} f^2 e^{-\left(\frac{T}{27} + \frac{D}{17}\right)} \quad (6)$$

Burada f_1 , f_2 borik asit ve ($MgSO_4$) moleküllerinin gevşeme frekanslarını temsil eder, s tuzluluk, pH suyun asitliği, T sıcaklık($^{\circ}C$), D metre olarak suyun derinliğidir. Şekil 5 tuzluluğun (s) 35 ppt, sırasıyla $T=4^{\circ}C$ ve $T=27^{\circ}C$ değerleri sabit alınarak derinliğin $D=0, 10, 30, 100m$ 'lik değerleri için denklem(6)'dan faydalanılarak kaynak frekansı üzerinden emme katsayısı değişimini göstermektedir.

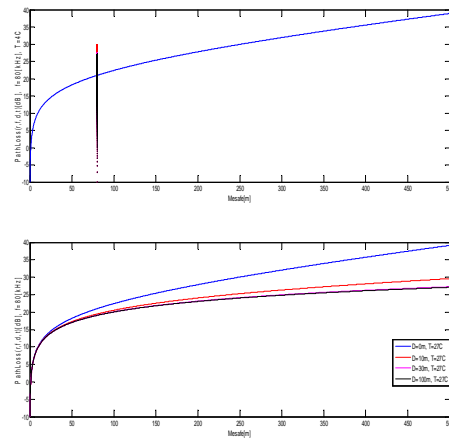
2.3. Yol kaybı

Toplam yol kaybını hem yayılım ve hem de emilim kayıplarının toplamı oluşturmaktadır. Urick[2], emme artı yayılma verimlerinin formülünü uzun menzilli gözlemlerle belirlemiştir ve bu değişim Şekil 6'daki gibi elde edilmiştir.

$$PL(r, f, d, t) = k \times 10 \log(r) + \alpha(f, d, t) \times r \times 10^{-3} (dB) \quad (7)$$



Şekil 5. Emme katsayısının frekansa bağlı değişimi.



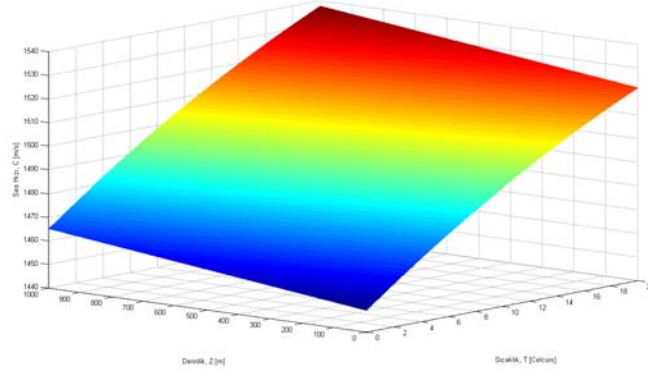
Şekil 6. Mesafeye bağlı belli derinliklerde yol kaybı.

Tuzluluk sabit alınarak (35ppt) kaynak frekansına bağlı değişim gösteren emme katsayısının ayrıca derinliğe göre de nasıl bir değişim gösterdiği yukarıda görülmektedir. Frekans, derinlik, sıcaklık parametrelerine göre emme katsayısı üzerinde büyük değişim farkları oluşmaktadır. Emme katsayısı üzerinde en etkili parametre daha öncede belirttiğimiz gibi frekans olmaktadır bunun yanı sıra derinliğin de emme katsayısı üzerinde oldukça etkili olduğu da Şekil 5’den anlaşılmaktadır. Yol kaybı (PL) mesafe arttığında karakteristikten anlaşıldığı üzere artış göstermektedir. Elde edilen karakteristikler sırasıyla $T=4^{\circ}\text{C}$ ve $T=27^{\circ}\text{C}$ altında ve $S=35\text{ppt}$ sabit alınarak mesafeye ve bunun yanında belirli derinlik değerlerine göre elde edilmiştir. $T=4^{\circ}\text{C}$ ’de alınan ölçümler 0m’lik derinlik için incelendiğinde yol kaybının daha düşük olduğunu söyleyebiliriz. Ancak aradaki fark oldukça azdır.

2.4. Ses hızı

Ses hızı suyun içinde havadaki yaklaşık 5 katı hızıyla hareket eder ve çok uzak mesafelere ulaşabilir, bu yüzden su altında bilgi taşımak için ses sinyalleri kullanılır. Normal okyanus şartlarında ses hızı 1450 m/s ile 1550 m/s arasında değişir. Okyanus; yukarıda deniz yüzeyi, aşağıda ise deniz tabanı ile sınırlı olan bir akustik dalga kılavuzudur ve bu bölgede yayılım yapan ses dalgalarının hızının değişiminde rol oynayan dört ana etken vardır; sıcaklık, derinlik, tuzluluk ve basınç. Ses hızı bahse konu bu değerlerdeki yükselmelerle birlikte artar; ancak yükselme hızı oranları farklıdır ve en az rolü tuzluluk artışı oynar.

$$C = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.0160Z \quad (8)$$



Şekil 7. Derinlik, sıcaklık ve tuzluluğa bağlı olarak ses hızı.

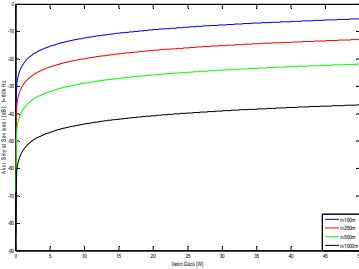
Burada C hız (m/s), T sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), S tuzluluk (ppt) ve Z derinlik (m) olarak alınır [6]. Ses hızı birçok ortam parametresine bağlı olarak değişim göstermektedir. Denklem (8)’den faydalanılarak ses hızı değişimini derinlik, sıcaklık ve tuzluluğa göre modellediğimizde ses hızı değişimi Şekil 7’de gözlemlendiği gibidir. Derinlik göz önüne alınırsa ses hızı ve derinlik arasında yaklaşık lineer bir ilişki olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 7’de elde edilen sonuçlara göre sabit tuzluluk altında ($S=35\text{ppt}$), ses hızı derinlik arttıkça derinlikle doğru orantılı olarak artmaktadır.

2.5. Alıcı akustik sinyal seviyesi

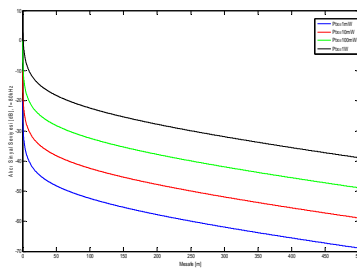
Alıcıdaki sinyal seviyesi (P_{rx}), verici gücüne ve yol kaybına bağlı olarak denklem (9)’daki gibi tanımlanabilir.

$$P_{rx} = P_{tx} - PL(r, f, d, t)(\text{dB}) \quad (9)$$

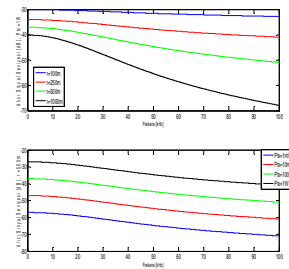
Burada PL yol kaybı başlığı altında denklem (7)’de daha önce verilmişti. Bu eşitlik üç parametreye bağlı olarak ele alınabilir. Birincisi frekans sabit alınarak ($f=80\text{kHz}$) verici gücüne bağlı belli mesafelerde alıcıdaki sinyal seviyesidir. Bu değişim, silindirik yayılım ($k=1$) için Şekil 8’de verildiği gibi olmaktadır. İkinci ise verici gücü ve frekans sabit alınarak mesafeye bağlı alıcıdaki sinyal seviyesidir. Bu durumda oluşan karakteristik ise şekil 9’daki gibidir. Son olarak incelenecek olan nokta ise frekansın alıcıdaki sinyal seviyesinde yarattığı etkidir ve bu durumda vericideki güç ve mesafe sabit olup değişimler Şekil 10’da olduğu gibi elde edilmektedir.



Şekil 8. Verici gücüne bağlı alıcı sinyal seviyesi.



Şekil 9. Alıcı sinyal seviyesi.



Şekil 10. Alıcı sinyal seviyesinin frekansa bağlı değişimi.

Alıcıdaki sinyal seviyesi haberleşme açısından oldukça önemlidir. Karasal haberleşmede ortalama olarak -100 dBm’lik bir alıcı eşik seviyesi bulunmaktadır. Su altı haberleşmesinde sağlıklı bir haberleşme oluşabilmesi için alıcı sinyal seviyesi önem arz etmektedir. Şekil 9 üzerinde bahsettiğimiz gibi alıcı sinyal seviyesi verici gücü ile doğru orantılı mesafe ile ters orantılı bir değişim karakteristiği sergilemektedir. Bu açıdan bakıldığında karasal sistemler gibi bir karakteristiği olduğunu söylemek mümkündür. 50-100m’den sonraki mesafe artışlarında lineere yakın bir ilişki oluşmaktadır. Verici güç seviyelerinin küçülmesi de alıcı sinyal seviyesini direkt aşağıya çekmektedir. Bu açıdan haberleşme mesafesi ve vericideki güç seviyesi iyi bir seçim ve analiz gerektirir. Frekansın etkisinin en temel nedeni ise önceki kısımlarda verdiğimiz emilim ve yol kayıpları görülebilir. Frekans artışı emilim kaybını arttırmakta idi bu artışa bağlı olarak yüksek frekanslara çıkıldıkça alıcı sinyal seviyesinde bir düşüş olduğu görülebilmektedir. Şekil 10’da oluşturulan karakteristiğe göre 10kHz civarı bir bant kullanılırsa alıcı sinyal seviyesinde frekans etkileri minimum düzeyde tutulabilir.

3. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada içerik olarak, su altı ortamında gerçekleşen akustik haberleşme karakteristikleri üzerinde ortamdaki kaynaklı oluşabilecek etkiler ön planda tutulmuştur. Çalışma ilkesi karasal RF haberleşmesi gibi olan ancak haberleşmenin ses üzerinden gerçekleştiği bu sistemlerde RF kullanılmamasının en temel nedeni, su altı ortamındaki yalıtkanlık sabitinin hava ortamına nazaran yüksek olmasından kaynaklı RF’in çok hızlı bir şekilde zayıflayarak haberleşme ortamına uygun olmamasıdır. Ses dalgaları (acoustic wave) ise su altı ortamında RF gibi hızlı bir zayıflama oluşturmadiğundan bu sistemler üzerinde haberleşme kanalında ses dalgaları kullanılmaktadır. Ancak akustik dalgalarda su altı haberleşme kanallarındaki birçok etkenden kaynaklı değişim gösteren bir karakteristiğe sahiptirler. Temel olarak üzerinde durulan ise bu karakteristiğin bağlı olduğu çevresel parametrelerdir. Günümüzde su altı dünyası gerek ülkemiz gerekse dünya açısından birçok soru işaretleri ve bilinmezler içermektedir. Dünyanın yaklaşık olarak 2/3 ü su ile kaplı olduğundan, su altı haberleşmesi alanında yapılan çalışmalar her geçen gün hız kazanmaktadır. Yaklaşık olarak 2 asır öncesinden günümüze kadar süren bu çalışmalar ele alındığında belli dönemlerde durağanlaşsa da artık oldukça önemli bir konuma sahip olduğunu görmekteyiz.

Kaynaklar

- [1] Boss W. Van D., Lisans Bitirme Tezi, SEA Hamburg 2004.
- [2] Urlick J., :Principles of Underwater Sound, 3rd Edition, Mc. Graw Hill, Inc. ISBN 0-07-066087-5, 1983.
- [3] Thorp W. H., “Deep-ocean sound attenuation in the sub- and low-kilocycle-per-second region,” Journal of the Acoustical Society of America, 38(4), s. 648–654, 1965.
- [4] Urban H. G., Handbook of Underwater Acoustic Engineering. STN ATLAS Elektronik GmbH, Nov. 2002.