

Sualtı Doğalgaz Boru Hatlarındaki Sızıntıların Eğri Uydurma Tabanlı Alınan Sinyalin Gücü Yöntemiyle Konumlandırılması

Locating Leakages In The Underwater Natural Gas Pipelines Using Curve Fitting Based Received Signal Strength Method

Yiğit MAHMUTOĞLU^{*1,a}, Kadir TÜRK^{2,b}

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Rize

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 07.06.2019

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 15.10.2019

• Kabul tarihi / Accepted: 20.10.2019

Öz

Doğalgaz rezervleri dünyanın belirli bölgelerinde bulunduğundan bu önemli enerji kaynağı talep merkezlerine ağırlıklı olarak sualtı boru hatları yardımıyla iletilmektedir. Sualtı doğalgaz boru hatları başta iç/dış korozyon olmak üzere doğa ve insan kaynaklı bazı nedenlerden dolayı delinip denize gaz sızdırabilir. Bu nedenle sualtı doğalgaz boru hatlarındaki (SDBH) sızıntıların tespiti ve konumlandırılması enerji güvenliğini sağlama ve çevre kirliliğinin önüne geçmede önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada, SDBH'lerde ortaya çıkabilecek deliklerin yerlerinin belirlenebilmesi amacıyla sinyal güçlerine eğri uydurmaya dayalı bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin konumlandırma başarımı, zamanla değişen çok yollu bir sualtı akustik kanalının ve gerçek hayatta kullanılan bir sualtı doğalgaz boru hattının parametrelerinin kullanıldığı benzetim çalışmalarıyla analiz edilmiştir. Sayısal sonuçlar, bu zamanla değişen çok yollu sualtı akustik kanalı için sızıntıların alıcı sayısı, ortam gürültüsü ve deniz dalga yüksekliğine bağlı olarak kilometrelerce uzaktan konumlandırılabilirliğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Konum Tespiti, Pasif Akustik, Sızıntı, Sualtı Doğalgaz Boru Hattı.

Abstract

Since natural gas reserves are located in certain regions of the world, this important energy resource is transported to demand centers mainly by means of underwater pipelines. Underwater natural gas pipelines can be punctured and so the natural gas may leak into the sea due to especially internal/external corrosion and nature and man-made based reasons. For this reason, detecting and locating leakages in the underwater natural gas pipelines has an important role in ensuring energy security and preventing environmental pollution. In this study, a curve fitting to signal strength based method is proposed for positioning the leakages. The localization performance of the proposed method is analyzed by simulation studies using a time-varying multipath underwater acoustic channel and parameters of a real life underwater natural gas pipeline. Numerical results show that for the time-varying multipath underwater acoustic channel leakages can be located with low errors from kilometers away depending on receiver number, ambient noise and sea wave height.

Keywords: Localization, Passive Acoustic, Leakage, Underwater Natural Gas Pipeline.

^{*a} Yiğit MAHMUTOĞLU; yigit.mahmutoglu@erdogan.edu.tr, Tel: (0464) 223 75 18 (dâhili: 1580), orcid.org/0000-0003-4409-2587

^b orcid.org/0000-0002-4504-8417

1. Giriş

Doğalgazın üretildiği bölgelerden talep merkezlerine doğru taşınması için genellikle boru hatları kullanılmaktadır. Büyük bir oranı denizlerden geçen bu boru hatları üç temel nedenden dolayı delinip denize gaz sızdırabilmektedir. İlk neden olan başlangıç kusurları (tasarım/üretim/montaj) malzeme kusurları, kaynak kusurları ve büyük artık gerilmeler olarak tanımlanır. İkinci neden olan çevresel yükler (gaz akışı esnasında) dengesiz işletme basıncı, fırtına-kasırğa-dalga-akıntı, iç/dış korozyon ve deniz yatağındaki tektonik hareketleri kapsamaktadır. Üçüncü neden olan ek yükler (gaz akışı esnasında) ise gemi çapası ve balıkçılık ağlarını içermektedir (Mao vd., 2015). Sızıntı vakalarının ne sıklıkta meydana geldiğine dair bir örnek olarak Meksika Körfezindeki sualtı boru hatlarında 1967-1990 yılları arasında yaşanan 1047 sızıntı verilebilir (United Nations, 2017). Başka örnekler olarak ise 1971-2000 yılları arasında Avrupa'da sualtı boru hatlarında meydana gelen 542 sızıntı ve 2001-2011 yılları arasında İngiltere'deki sualtı boru hatlarında meydana gelen 1978 sızıntı verilebilir (United Nations, 2017; Li vd., 2016). Bu nedenle sualtı doğalgaz boru hatlarının (SDBH) izlenmesi ve sızıntı durumunda mümkün olan en hızlı biçimde müdahale edilmesi enerji güvenliğini sağlama ve çevre kirliliğinin önüne geçmede önemli bir yere sahiptir.

Literatüre bakıldığında, SDBH'lerde oluşabilecek sızıntıların tespit edilmesi, yerlerinin belirlenmesi için içsel yöntemler ve dışsal yöntemler olarak gruplandırılan çeşitli yöntemler tanıtılmıştır. Fakat dışsal yöntem olarak gruplandırılan yöntemlerden olan pasif akustik yöntemi (PAY) dışında diğer yöntemler sualtı ortamından etkilenme, yüksek maliyetli sistem gerektirme, konum tespiti yapamama gibi çok sayıda dezavantaja sahiptir (Mahmutoglu ve Turk, 2019). SDBH'lerdeki sızıntı deliklerinin konumlarının belirlenmesi için (Mahmutoglu ve Turk, 2017, 2018a,b, 2019) çalışmalarında pasif akustik tabanlı olan çeşitli yöntemler sunulmuştur. Bu çalışmalarda tek yollu sualtı akustik kanalı göz önüne alınmıştır. (Mahmutoglu ve Turk, 2018b) çalışmasında da kanalın rastgele değişim etkisi ihmal edilmiş ancak deniz yüzeyi ve tabanından dolayı oluşan yansıma etkilerini içeren çok yollu bir sualtı akustik kanalı kullanılmıştır. Ancak gerçekçi bir sualtı akustik kanalı deniz akıntıları, deniz yüzeyinin hareketli yapısı ve verici/alıcı hareketliliği nedeniyle değişken bir geometrik

yapıya, saçılım ve Doppler kayma etkilerine sahiptir.

Bu çalışmada, (Qarabaqi ve Stojanovic, 2013a) çalışmasında önerilen ve literatürde sıklıkla kullanılan oldukça gerçekçi bir sualtı akustik kanal modeli kullanılarak, SDBH'lerdeki sızıntıların konumlandırılması problemi ele alınmıştır. Deniz yüzeyinin zamanla değişim etkisinin de modellendiği bu kanal modelinde akustik yayılımın birçok fiziksel özelliği göz önünde bulundurulmuştur. Çok yollu bayılma etkisine sahip bu zamanla değişen kanalda sızıntı konumlarının tespit edilmesi için literatürde önerilmiş olan pasif akustik tabanlı yöntemler yetersiz kalmaktadır. Bu durumda sızıntıların konumlandırılabilmesi için sualtı akustik kanalının çok yolluluk etkisiyle mücadele edilmesi gerekmektedir.

Konumlandırma literatüründe kanalın çok yolluluk etkisinin azaltılması için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazılarında kullanılan erken-eksi-geç kilitlemeli çevrim, gecikme kilitlemeli çok yolluluk tahmincisi, çift delta tekniği, erken eksi geç eğimi, evre-uyumsuz gecikme kilitlemeli çok yolluluk tahmincisi ve dalgacık analizi gibi tekniklerde kanalı tanımak için vericiden alıcıya, alıcı tarafından bilinen bir eğitim dizisi gönderilmiştir (Aram vd., 2007; Marx vd., 2009; Bhuiyan ve Lohan, 2010; Tamazin vd., 2016). Başka çalışmalarda ise frekans çeşitlemesi yöntemi ve kepstrum yöntemleri kullanılmıştır (Ladha vd., 2007; Li-jun vd., 2012; Lazaro vd., 2013). Ancak bu yöntemler, doğaları gereği SDBH'lerde ortaya çıkabilecek deliklerin yerlerinin tespit edilmesi için uygun değildir.

Bu çalışmada, SDBH'lerde ortaya çıkabilecek deliklerin yerlerinin belirlenebilmesi amacıyla ortalama sinyal güçlerine eğri uydurmaya dayalı yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde sızıntı deliklerinin konumlarının tespit edilmesi için doğrusal en küçük kareler (DEKK) ve ağırlıklandırılmış DEKK (ADEKK) algoritmaları kullanılmıştır. İncelemelerde (Qarabaqi ve Stojanovic, 2013a)'da önerilen gerçekçi sualtı akustik kanal modeli kullanılmıştır. Önerilen yöntemin ve algoritmaların başarımı çeşitli alıcı sayısı, ortam gürültüleri ve deniz yüzeyindeki dalga yükseklikleri için analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. Sualtı Akustik Kanalı ve Ortam Gürültüsü

2.1. Sualtı Akustik Kanalı

Sualtı ortamı coğrafyaya, derinliğe sualtı şekillerine göre önemli değişikliklere sahip olduğundan sualtı akustik kanal modelleri konusunda literatürde bir fikir birliği yoktur. Kullanılan bazı kanal modellerinin, kanalın rastgele değişimlerini göz ardı etmekte (Porter ve Bucker, 1987), yüksek rüzgar hızları için tutarsız sonuçlar vermekte (Heitsenrether ve Badiey, 2004) ve yüksek hesaplama karmaşıklığına sahip olmaktadır (Peterson ve Porter, 2013). Bunların haricinde, sualtı akustik kanalı için stokastik model geliştirme amacıyla da çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir (Galvin ve Coats, 1996; Wang ve Yang, 2006; Radosevic vd., 2009; Socheleau vd., 2009; Qarabaqi ve Stojanovic, 2009,2011; Tomasi vd., 2010; Zhang vd., 2010). Bahsi geçen çalışmalarda genellikle sınırlı bölgelerde yapılan akustik ölçümler kullanılarak kanal modelleri oluşturulmuştur. Ancak, yukarıda da belirtildiği gibi sualtı ortamları farklı bölgelerde birbirlerinden çok farklı özellikler gösterebilir. Bu nedenle bu çalışmalarda ortaya konulan kanal modellerinin geçerli olduğu bölgeler de kısıtlıdır.

Literatürde önerilen diğer sualtı akustik kanal modelleriyle karşılaştırılınca (Qarabaqi ve Stojanovic, 2013a)'da sualtı akustik kanalı daha gerçekçi modellenmiş olup ilgili çalışmanın yazarları kanalı tanımlamak için detaylı bir matematiksel inceleme yapmıştır. Kanal tanımlanırken akustik yayılımın fiziksel özellikleri olan alıcı/vericinin rastgele yer değiştirmeleri, Doppler etkisi, frekans tabanlı zayıflatma ve yüzey/tabana yansımaları gibi bir çok etki göz ardı edilmiştir. (Qarabaqi ve Stojanovic, 2013a)'da sualtı kanalındaki değişimler, küçük ölçekli ve büyük ölçekli olarak sınıflandırılmıştır. Değişen sistem geometrisine bağlı olarak ortaya çıkan konum belirsizliğini tanımlamak için alınan sinyalin ortalama gücünü etkileyen büyük ölçekli değişimler kullanılır. Anlık kanal tepkesindeki hızlı değişimlerden sorumlu olan küçük ölçekli değişimler ise saçılım ve Doppler etkilerini tanımlamak için kullanılır. Kısaca, vericiden gönderilen sinyal sabit geometriye sahip bir

kanalda (nominal kanal) alıcılara farklı varış açılarında ve farklı uzunluklara sahip yolları kat ederek ulaşacaktır. Büyük ölçekli değişimler, verici ile alıcı arasındaki yolun uzunluğunun rastgele değişmesine neden olmaktadır. Diğer taraftan küçük ölçekli değişimler ise verici ile alıcı arasındaki her bir yoldan ilerleyen sinyalin saçılmasına ve böylece çeşitli sayıda alt yola ayrılmasına neden olmaktadır. Literatürde sıklıkla kullanılan bu kanalın transfer fonksiyonu (1) denkleminde verilmiştir (Pedrosa vd., 2014; Kari vd., 2017; Zhao vd., 2017).

$$H(f) = \bar{H}_0(f) \sum_p h_p \gamma_p(f) e^{-j2\pi f \tau_p} \quad (1)$$

Burada, $\bar{H}_0(f)$, p , h_p , $\gamma_p(f)$ ve τ_p sırasıyla referans yol için transfer fonksiyonu, yol sayısı, yol kazancı, saçılma katsayısı ve yol gecikmesidir. Değişkenler hakkındaki detaylı bilgiler ve eşitlikler (Qarabaqi ve Stojanovic, 2013a)'da verilmiştir.

Qarabaqi ve Stojanovic tarafından önerilen bu analitik kanal modeli, yine yazarlar tarafından deneysel çalışmalar yapılarak doğrulanmış ve (Qarabaqi ve Stojanovic, 2013b)'de tanımlanan bir kanal simülatörü geliştirilmiştir. Bahsi geçen sualtı akustik kanal simülatöründe, küçük ölçekli değişimlerin benzetimleri için istatistikî denk model veya direk model kullanılmıştır. Büyük ölçekli değişimlerin etkisini ortaya koyabilmek için ise deniz tabanının ve yüzeyinin düzgün ve ses hızının sabit olduğu kabul edilerek Bellhop ya da basitleştirilmiş ışın izleme ışın seçenekleri sunulmuştur.

2.2. Sualtı Ortam Gürültüsü

Sualtı ortam gürültüsü kaynakları Gauss dağılımlı olarak modellenmektedir. Türbülans (N_t), gemi (N_s), dalga (N_w) ve termal (N_{th}) gürültüleri sualtı ortam gürültüsünü temsil etmek için kullanılan dört ana kaynaktır. (2)-(5) denklemlerinde bu gürültülerin güç spektral yoğunluklarının ampirik formülleri dB re $1\mu\text{Pa}/\text{Hz}$ cinsinden ve frekansın (kHz cinsinden) bir işlevi olarak sunulmuştur (Stefanov ve Stojanovic, 2011).

$$N_{t_dB} = 10 \log_{10} N_t(f) = 17 - 30 \log_{10}(f_0) \quad (2)$$

$$N_{s_dB} = 10 \log_{10} N_s(f) = 40 + 20(s - 0.5) + 26 \log_{10}(f_0) - 60 \log_{10}(f_0 + 0.03) \quad (3)$$

$$N_{w_dB} = 10 \log_{10} N_w(f) = 50 + 7.5\sqrt{w} + 20 \log_{10}(f_0) - 40 \log_{10}(f_0 + 0.4) \quad (4)$$

$$N_{th_dB} = 10 \log_{10} N_{th}(f) = -15 + 20 \log_{10}(f_0) \quad (5)$$

Burada w m/sn cinsinden rüzgar hızı ve s gemi aktivite faktörüdür ($0 \leq s \leq 1$). Ortam gürültüsünün toplam güç spektral yoğunluğu (6) denkleminde verilmiştir.

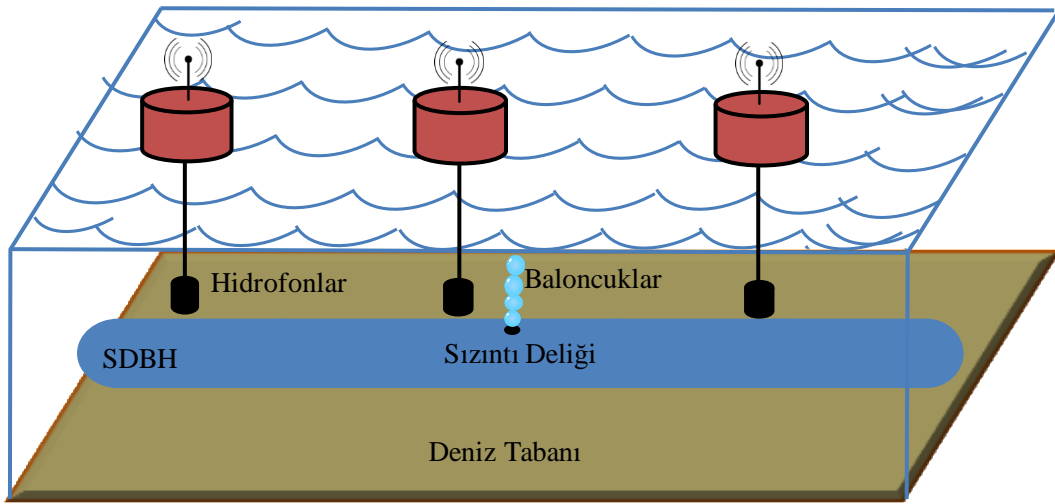
$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f) \quad (6)$$

3. Sızıntı Konumlandırma Yöntemi

Oluşturulan konumlandırma sistemi Şekil 1’de gösterilmiştir. Burada hidrofonların (alıcıların) aralarında eşit mesafe bulunan şamandıralardan SDBH’nin üstüne sarkıtıldığı varsayılmıştır. Bu hidrofonlar aracılığıyla alınan akustik sinyallerin kara ortamındaki bir merkeze gönderildiği ve

burada önerilen yöntem kullanılarak sızıntının konumlandırıldığı varsayılmıştır. SDBH’nin izlediği yol ve derinliği bilindiğinden üç boyutlu konumlandırma problemi tek boyuta indirgenmiştir.

Hidrofonlar tarafından alınan akustik sinyaller, sızıntı deliğinin çapı ve sualtı akustik kanalına göre değişiklik gösteren çok dar bir banda sahip işaretlerdir. Bu sebeple, (Mahmutoglu ve Turk, 2018a) çalışmasına benzer olarak, alıcı kısmında sızıntılardan dolayı oluşan akustik sinyalin bulunabileceği tüm spektrum 3 Hz’lik bir bant genişliğine sahip bant geçiren filtre yardımıyla taranır.



Şekil 1. Konumlandırma sistemi

Daha sonra, alınan sinyalin frekansı, benzetim sonuçları bölümünde verilen parametreler, (Mahmutoglu ve Turk, 2018a)’da verilen eşitlikler ve (7) denklemini kullanılarak delikten çıkan akustik sinyalin gücü hesaplanabilir. Filtreden geçirilen sinyallerin güçleri kaydedilir ve belirli bir süre boyunca ortalamaları alınır. Böylece ortam gürültüsünün sinyal üzerindeki etkisi azaltılmış olur.

$$P = \sum_{i=1}^B P_0 e^{-(\pi \delta f_0 (t - \tau_i))} \cos(2\pi f_0 (t - \tau_i) - \vartheta) \quad (7)$$

Burada, P , δ , ϑ , P_0 , t , B , f_0 ve τ_i sürekli bir baloncuk dizisi için akustik basınç sinyali, sönüm katsayısı, faz açısı, akustik basınç sinyalinin tepe değeri, zaman, salınım yapan baloncuk sayısı, salınım frekansı, 1. ve i. baloncuklar arasındaki zaman gecikmesidir. Bu değişkenler hakkındaki detaylı bilgiler ve eşitlikler (Mahmutoglu ve Turk, 2018a)’da verilmiştir.

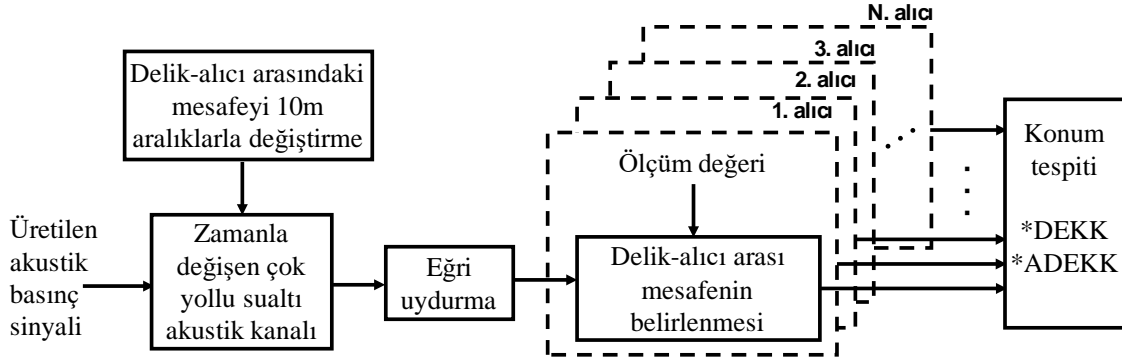
Her ne kadar delikten çıkan ve alınan akustik sinyallerin güçleri bilinse de zamanla değişen çok yollu sualtı akustik kanalının neden olduğu bayılma etkisinden dolayı sızıntıyı düşük hatalı olarak konumlandırmak mümkün değildir. Bu nedenle sızıntının konumunu tespit etmek için sinyal gücü tabanlı eğri uydurma yöntemi önerilmiştir. Bahsi geçen yöntemde, alıcıya ulaşan sinyal yukarıda verilen filtreleme ve ortalama olarak gürültü azaltma safhalarından geçirilir.

Blok diyagramı Şekil 2’de verilmiş olan yöntem aşağıdaki gibi maddeler halinde açıklanabilir.

- 1- Sızıntıyı oluşturan delik ile alıcı arasındaki mesafe kısa aralıklarla değiştirilerek tüm boru hattı taranır.
- 2- Sualtı akustik kanal modeline göre akustik sinyalin delikten çıkış gücü hesaplanabildiğinden, her mesafe için alıcılara ulaşması beklenen zamanla değişen gürültüsüz sinyalin gücü kaydedilir ve

- ortalaması hesaplanır. Bekleneceği sızıntı deliği ve alıcı mesafesi büyüdükçe alınan sinyalin gücü kanal sebebiyle ortaya çıkan bayılma nedeniyle düzensiz bir azalma gösterir. Bu düzensiz azalma ise yüksek konumlandırma hatalarına neden olur.
- 3- Bayılma ile oluşan düzensiz azalma etkisini azaltmak için kaydedilen delik-alıcı arası mesafeye göre değişen ortalama sinyal gücü veri setine (eğrisi), Gauss modeline göre eğri uydurulur.

- 4- Sızıntı deliği için konumlandırma yapılırken alıcılar tarafından alınan sinyallerin ortalama güçlerine karşılık gelen Gauss modeline göre elde edilmiş eğrideki mesafe değerleri delik ile alıcılar arasındaki uzaklığı vermektedir.
- 5- DEKK veya ADEKK algoritmaları kullanılarak sızıntı deliğinin konumu tespit edilir.



Şekil 2. Konumlandırma yönteminin blok diyagramı

Tek boyutlu uzayda konumu bilinmeyen deliğin yeri x ve konumları bilinen alıcıların yerleri x_z ($z = 1, 2, \dots, m$) ile verildiğinde sızıntı deliği ile alıcı arasındaki uzaklık $d_z = \sqrt{(x_z - x)^2}$ şeklinde elde edilebilir. Elde edilen eğri kullanılarak bulunan sızıntı deliği ile alıcı arasındaki uzaklık \hat{d}_z olmak üzere, konumu bilinmeyen deliğin yeri DEKK algoritmasına göre (8) denklemi kullanılarak bulunabilir (Yang ve Chen, 2009; Wang, 2015).

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (8)$$

Yukarıdaki denklemde A ve b değişkenleri sırasıyla (9) ve (10) eşitliklerinde sunulmuştur.

$$A = \begin{bmatrix} x_1 - \frac{1}{m} \sum_{z=1}^m x_z \\ \vdots \\ x_1 - \frac{1}{m} \sum_{z=1}^m x_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$b = 0.5 \begin{bmatrix} \left(x_1^2 - \frac{1}{m} \sum_{z=1}^m x_z^2 \right) - \left(\hat{d}_1^2 - \frac{1}{m} \sum_{z=1}^m \hat{d}_z^2 \right) \\ \vdots \\ \left(x_m^2 - \frac{1}{m} \sum_{z=1}^m x_z^2 \right) - \left(\hat{d}_m^2 - \frac{1}{m} \sum_{z=1}^m \hat{d}_z^2 \right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

ADEKK algoritmasıyla bilinmeyen delik konumu, (9), (10) ve (11) denklemlerinde verilen matrisler (12) denkleminde yerine yazılarak bulunur (Zekavat ve Buehrer, 2011; Wang, 2015).

$$W = \left[4 \left(\frac{1}{m} \sum_{z=1}^m \hat{d}_z \right)^2 \sigma^2 + 2\sigma^4 + \text{diag}(4\sigma^2 \hat{d}_1^2 + 2\sigma^4, \dots, 4\sigma^2 \hat{d}_m^2 + 2\sigma^4) \right]^{-1} \quad (11)$$

Burada W ağırlıklandırma matrisi ve σ^2 alıcılardaki gürültünün varyansıdır. $\text{diag}(\cdot)$ köşegen matrisi ifade etmektedir.

$$\hat{x} = (A^T W A)^{-1} A^T W b \quad (12)$$

4. Benzetim Sonuçları

Önerilen yöntemin konum tespiti performansını incelemek için oluşturulan benzetim platformunda gerçek bir SDBH'nin 10 km'lik kısmı ele alınmıştır. 400 m derinlikten geçen bu SDBH 136 m³/sn'lik gaz akış hızına sahiptir (Kandiyoti, 2009). Tablo 1'de verilen parametreler, (Mahmutoglu ve Turk, 2018a)'da verilen eşitlikler ve (7) denklemi kullanılarak birçok baloncuğun sürekli olarak oluştuğu durum için akustik sinyal elde edilmiştir.

Bu çalışmada, (Qarabaqi ve Stojanovic, 2013b)'de önerilen kanal simülatörü sualtı akustik kanalını oluşturmak için kullanılmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi bu simülatörde büyük ölçekli değişimlerin etkisini ortaya koyabilmek için ise deniz tabanının ve yüzeyinin düzgün ve ses

hızının sabit olduğu kabul edilerek Bellhop yada basitleştirilmiş ışın izleme ışın seçenekleri sunulmuştur. Deniz taban yapısı ve ses hızı profili (ses hızının derinlikle değişimi) bölgeden bölgeye farklılık göstereceğinden, belirli bir deniz taban yapısı ve ses hızı profili için ışın izleme işlemini gerçekleştiren Bellhop yerine daha genel olması sebebiyle basitleştirilmiş ışın izleme kullanılmıştır. Küçük ölçekli etkileri ortaya koymak için direk model kullanılmıştır.

Tablo 1. Varsayılan parametreler

Parametre	Değer
g (yer çekimi ivmesi)	9.8 m/sn ²
h (derinlik)	400 m
ρ (deniz suyunun yoğunluğu)	1000 kg/m ³
κ (özel ısı oranı)	1.49
τ (baloncuklar arasındaki zaman gecikmesi)	0.01975 sn
d_{ref} (referans mesafe)	1 m
d_{del} (sızıntı deliğini çapı)	1 mm
S (yüzey gerilmesi)	0.068 N/m
Q (gaz akış hızı)	136 m ³ /sn

Simülasyonda kullanılan kanal, yüzey dalga, büyük ve küçük ölçekli etkiler için kullanılan benzetim parametreleri değerleri Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. İlgili denklemler (Qarabaqi ve Stojanovic, 2013a)'da yer almaktadır.

Tablo 2. Yüzey dalga ve kanal değişkenleri değerleri.

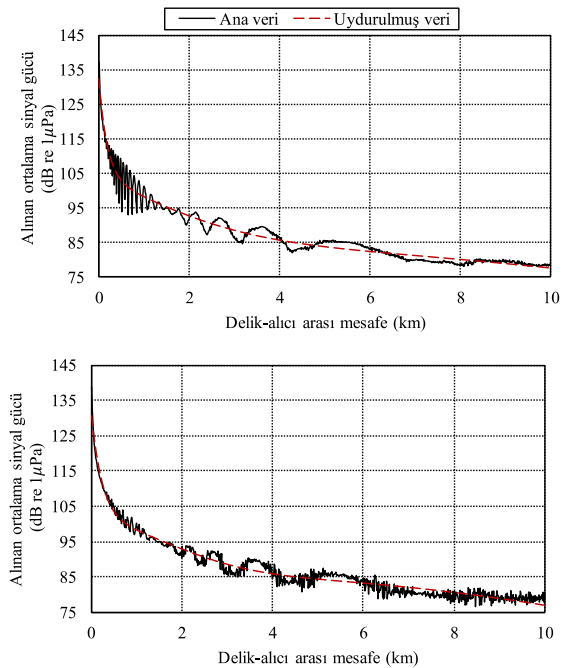
Değişken	Değeri
Alıcı derinliği	398 m
Boru hattı ve deniz derinliği	400 m
Delik – alıcı arası mesafe	0-10 km
Sızıntı deliğinin derinliği	400 m
Sudaki ses hızı	1500 m/sn
Yayılm faktörü	2
Deniz tabanının yoğunluğu	1800 kg/m ³
Deniz tabanındaki ses hızı	1200 m/sn
Kesim faktörü	20
Suyun yoğunluğu	1000 kg/m ³
Minimum frekans	49.7 Hz
Bant genişliği	3 Hz
Frekans çözünürlüğü	0.003 Hz
Zaman çözünürlüğü	0.1 s
Dalga genliği (yüksekliği, A_w)	1 m, 5 m
Dalga frekansı	0.1 Hz

Dalga yüksekliğinin 1 m ve 5 m olduğu durumlarda sızıntının olduğu delik ile alıcı arasındaki yolda 10 m aralıklarla boru hattı boyunca noktalar belirlenmiş ve bu noktalarındaki zamanla değişen gürültüsüz alınan sinyallerin güçlerinin ortalamaları hesaplanmıştır. Elde edilen ortalama sinyal gücü veri dizileri üç terimli olarak Gauss modeline uydurulmuştur. Şekil 3'te dalga

yüksekliğinin 1 m ve 5 m olduğu durumlar için elde edilmiş (ana) veri dizileri ve bu dizilere uydurulan eğriler sunulmuştur. Benzetimler boyunca, ortam gürültüsünün alıcılarda oluşturduğu gürültü gücü 3 Hz bant genişliği esas alınarak hesap edilmiştir. Sızıntının olduğu deliğin yeri 0-10 km arasında 10 m aralıklarla değiştirilmiştir.

Tablo 3. Büyük ölçekli ve küçük ölçekli etkiler için kullanılan değişken değerleri.

Değişken	Değeri
Alıcı yüksekliğinin değişim aralığı	[0 5] m
Deniz yüzeyindeki büyük ölçek yüksek değişimlerinin standart sapması	1
Deniz yüzey yüksekliğinin değişim aralığı	[-10 10] m
Toplam benzetim sinyali süresi	80 sn
Kanal mesafesinin değişim aralığı	[-20 20] m
Büyük ölçekli değişimler için AR	0.9
Deniz yüzeyindeki küçük ölçekli yüzey değişimlerinin varyansı	1.125
Kanal boyunun büyük ölçekli değişimleri için standart sapması	1
Küçük ölçekli değişimlerde bağdaşım süresi	40 sn
Alt yollardaki gecikmelerin 3-dB güç spektral yoğunlukları genişliği	0.0005
Küçük ölçekli taban değişimlerinin varyansı	0.5625
Alt yol genliklerinin ortalaması	0.025
Alıcı yüksekliğinin büyük ölçekli değişimlerinin standart sapması	1
Alt yol genliklerinin varyansı	0.000006
Alt yol sayısı	20



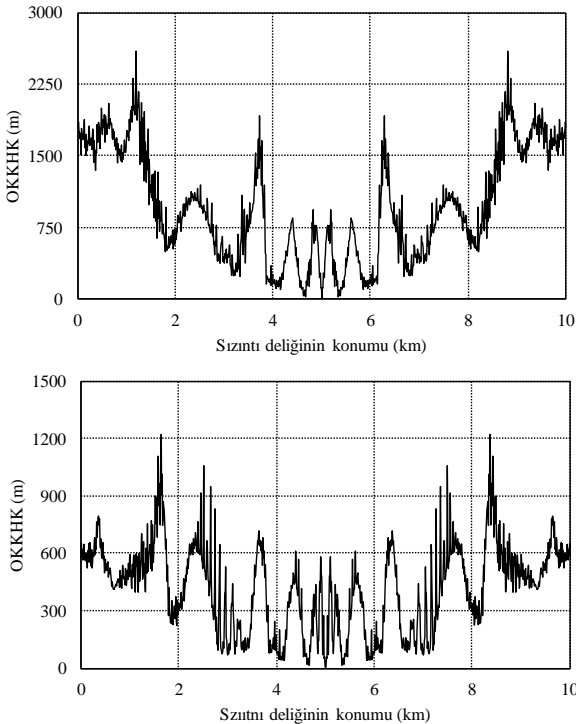
Şekil 3. Dalga yükseklikleri 1 m (üstte) ve 5 m (altta) için hesaplanan veri setleri ve bunlara üç terimli olarak Gauss modeline göre uydurulan eğriler.

Önerilen yöntemin konumlandırma başarımı farklı dalga yüksekliği, ortam gürültüsü ve alıcı sayısı olmak üzere üç değişik durum için incelenmiştir. Farklı alıcı sayısı durumu haricindeki diğer durumlarda alıcı sayısı 4 ve bu alıcıların yerleri (2 km, 4 km, 6 km, 8 km) olarak seçilmiştir. Bu çalışmada ele alınan beş farklı ortam gürültüleri olan N_1 , N_2 , N_3 , N_4 ve N_5 daha önce bahsedilen tüm ortam gürültüsü bileşenlerini içermektedir. Bahsedilen ortam gürültüleri Tablo 4'te verilmiştir. Burada w m/s cinsinden rüzgâr hızı ve GAF gemi aktivite faktörüdür.

Tablo 4. Ortam gürültüleri

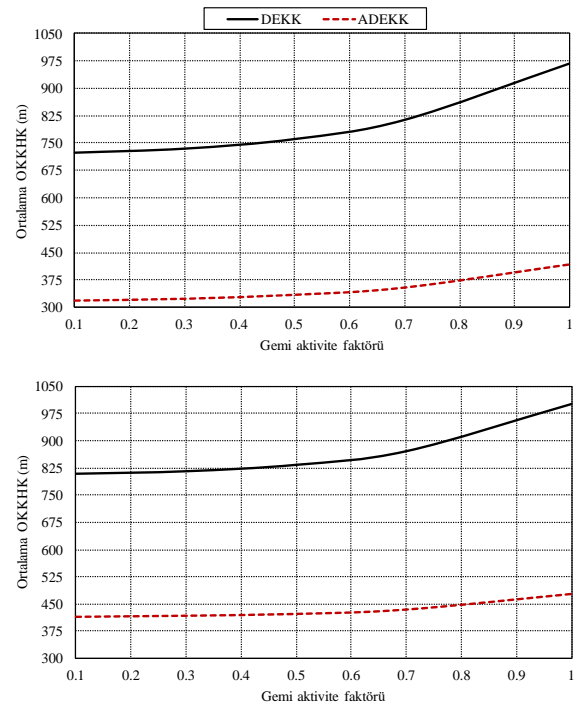
Ortam gürültüsü	w (m/s) ve GAF	Güç (dB re $1\mu\text{Pa}$)
N_1	19 ve 0.1	80.75
N_2	19 ve 0.3	83.87
N_3	19 ve 0.5	87.46
N_4	19 ve 0.7	91.3
N_5	19 ve 1	97.2

Şekil 4'te dalga yüksekliğinin 1 m, ortam gürültüsünün N_5 , alıcı sayısının 4 olduğu durum için DEKK ve ADEKK algoritmalarında sızıntı deliğinin konumu ile ortalama karesel konum hatasının karekökünün (OKKHK) değişimi verilmiştir. Kanalin bayılma etkisi kendisini bu eğrilerde OKKHK değerlerindeki ani düşüş ve artışlarla göstermiştir.



Şekil 4. DEKK (üstte), ADEKK (altta) algoritmaları, dalga yüksekliği 1 m, alıcı sayısı 4 ve ortam gürültüsü N_5 olduğu durumda sızıntı deliğinin konumuna göre OKKHK'nin değişimi.

Farklı dalga yüksekliği durumlarında delik konumunun 10 m aralıkla değiştirildiği 10 km uzunluğundaki boruda hesaplanan OKKHK değerlerinin ortalamaları ve gemi aktivite faktörleri arasındaki ilişkiler her iki algoritma için de Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere ADEKK'nin başarımı DEKK'den daha yüksektir. Konumlandırma doğruluğunun gemi aktivitesinin (ortam gürültü gücü) artışıyla ters orantılı olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, dalga yüksekliğinin konum tespitini önemli ölçüde bozduğu da görülmektedir.



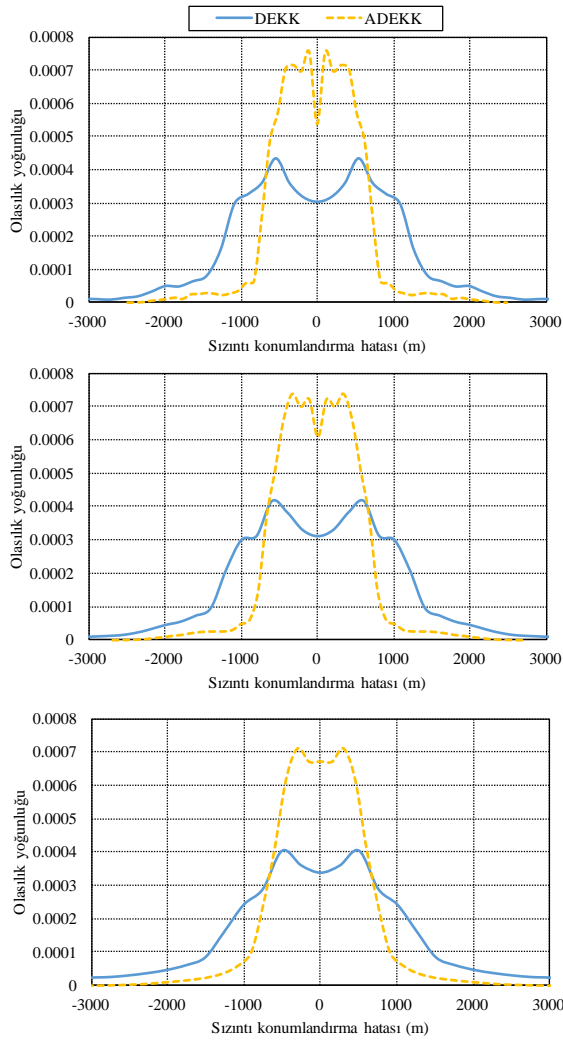
Şekil 5. Tüm algoritmalar için dalga yüksekliklerinin 1 m (üstte) ve 5 m (altta) olduğu durumda ortalama OKKHK'nin gemi aktivite faktörüne göre değişimi.

Ortam gürültüleri N_1 , N_3 , N_5 , dalga yüksekliği 5 m için DEKK, ADEKK algoritmalarının konum hataları ve bu konum hatalarının olasılık yoğunlukları arasındaki ilişkiler Şekil 6'da sunulmuştur. Tablo 5'te ise dalga yüksekliklerinin 1 m ve 5 m, ortam gürültülerinin N_1 , N_3 , N_5 olduğu durumda DEKK, ADEKK algoritmaları ile elde edilen 500 m'den düşük konumlandırma hatalarının olma ihtimalleri sunulmuştur.

Alıcı sayısının 3, 4, 5 ve 6 olduğu durumlar incelenmiştir. Bu alıcılar 10 km'lik hat üzerinde sırasıyla (3 km, 5 km, 7 km), (2 km, 4 km, 6 km, 8 km), (1 km, 3 km, 5 km, 7 km, 9 km) ve (1 km, 2.6 km, 4.2 km, 5.8 km, 7.4 km, 9.8 km) konumlarına yerleştirilmiştir.

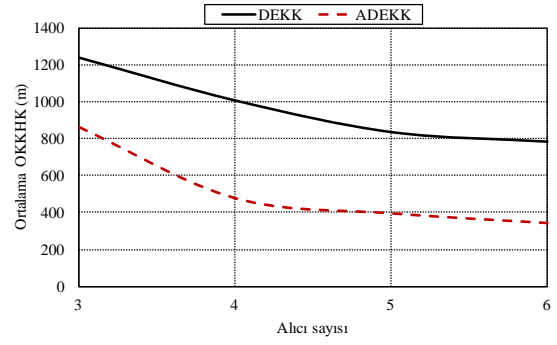
Tablo 5. 1 m ve 5 m dalga yükseklikleri, N_1 , N_3 , N_5 ortam gürültüleri ve DEKK, ADEKK algoritmaları için konum hatalarının 500 m'den düşük olma olasılıkları.

$A_w=1$ m	Gürültü	DEKK	ADEKK
	N_1	%40.4	%78.62
N_3	%37.7	%77.26	
N_5	%36	%71.7	
$A_w=5$ m	Gürültü	DEKK	ADEKK
	N_1	%36.48	%69.64
N_3	%34.76	%69.53	
N_5	%33.64	%67.69	



Şekil 6. 5 m dalga yüksekliği durumunda N_1 (üstte), N_3 (ortada), N_5 (altta) ortam gürültüleri ve her iki algoritma için konum hatası ve olasılık yoğunluğu arasındaki ilişkiler.

Çeşitli alıcı sayıları için sızıntı delik konumunun 10 m aralıklarla değiştirilerek elde edilen OKKHK'lerin ortalamalarının değişimi, dalga yüksekliğinin 5 m, ortam gürültüsünün N_5 olduğu durumda DEKK, ADEKK algoritmaları için Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Dalga yüksekliği 5 m, ortam gürültüsü N_5 için ortalama OKKHK'nın alıcı sayısına göre değişimi.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, sualtı doğalgaz boru hatlarında ortaya çıkabilecek deliklerin yerlerinin belirlenebilmesi amacıyla ortalama sinyal güçlerine eğri uydurmaya dayalı yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemle DEKK ve ADEKK algoritmaları kullanılarak sızıntı deliği konumlandırılmıştır. Yöntemin konumlandırma başarımını ortaya koymak için yapılan benzetim çalışmalarında gerçek hayatta kullanılan bir SDBH göz önüne alınmış ve oldukça gerçekçi olan çok yollu zamanla değişen bir sualtı akustik kanal modeli kullanılmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda, 10 km uzunluğa sahip bu SDBH'deki sızıntının farklı dalga yüksekliği ve ortam gürültüsü durumlarında DEKK ve ADEKK algoritmaları için sırasıyla (4 alıcı için) %33.64 ile %40.4 ve %67.69 ile %78.62 arasında değişen olasılıklarla 500 m'den düşük hatalarla konumlandırılabilceği gösterilmiştir.

Kaynaklar

- Aram, M., El-Rabbany, A., Krishnan, S. ve Anpalagan, A., 2007. Single Frequency Multipath Mitigation Based On Wavelet Analysis. *Journal of Navigation* 60, 281-290.
- Bhuiyan, M.Z.H. ve Lohan, E.S., 2010. Advanced Multipath Mitigation Techniques for Satellite-Based Positioning Applications. *International Journal of Navigation and Observation*, 2010, 1-15.
- Galvin, R. ve Coats, R.E.W., 1996. A stochastic underwater acoustic channel model, *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS Conference*, September 1996, Florida, USA, s. 203-210.
- Heitsenrether, R. M. ve Badiy, M., 2004. Modeling acoustic signal fluctuations induced by sea surface roughness, *Proceedings of High*

- Frequency Ocean Acoustics Conference, March 2004, California, USA, s. 214-221.
- Kandiyoti, R., 2009. Under the sea. *Engineering & Technology*, 4, 26-28.
- Kari, D., Marivani, I., Khan, F., Sayin, M. O. ve Kozat, S. S., 2017. Robust adaptive algorithms for underwater acoustic channel estimation and their performance analysis. *Digital Signal Processing*, 68, 57-68.
- Ladha, C., Sharif, B. S. ve Tsimenidis, C. C., 2007. Mitigating propagation errors for indoor positioning in wireless sensor networks, *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, October 2007, Pisa, Italy, s. 8-11.
- Lazaro, A., Girbau, D., Moravek, P. ve Villarino, R., 2013. A Study on Localization in Wireless Sensor Networks using Frequency Diversity for Mitigating Multipath Effects. *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTEHNIKA*, 19, 82–87.
- Li, X., Chen, G. ve Zhu, H., 2016. Quantitative risk analysis on leakage failure of submarine oil and gas pipelines using Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 163-173.
- Li-Jun, C., Xiang, G. ve Liang, A., 2012. Multipath passive localization in shallow water channel. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 48, 609-615.
- Mahmutoglu, Y. ve Turk, K., 2017. Remote leak hole localization for underwater natural gas pipelines, 40th *Telecommunications and Signal Processing Conference*, July 2017, Barcelona, Spain, s. 528-531.
- Mahmutoglu, Y. ve Turk, K., 2018a. A passive acoustic based system to locate leak hole in underwater natural gas pipelines. *Digital Signal Processing*, 76, 59-65.
- Mahmutoglu, Y. ve Turk, K., 2018b. Localization of Leakages in Underwater Natural Gas Pipelines for Multipath Propagation, 26th *Signal Processing and Communications Application Conference*, May 2018, İzmir, Turkey, s. 1-4.
- Mahmutoglu, Y. ve Turk, K., 2019. Received signal strength difference based leakage localization for the underwater natural gas pipelines. *Applied Acoustics*, 153, 14-19.
- Mao, D., Chu, G., Yanga, L. ve Li, Z., 2015. Deepwater Pipeline Damage and Research on Countermeasure. *Aquatic Procedia*, 3, 180–190.
- Marx, M., Kokozinski, R. ve Müller, H.C., 2009. Time Synchronization for Real Time Localization Systems with Multi Path Mitigation, *IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning and RFID*, September 2009, Cavtat, Croatia, s. 1-4.
- Pedrosa, P., Dinis, R. ve Nunes, F. 2014., Joint Equalization and Phase Drift Estimation for Underwater Acoustic Communications, *IEEE Global Communications Conference*, December 2014, Texas, USA, s. 4096-4101.
- Peterson, J.C. ve Porter, M.B., 2013. Ray/beam tracing for modeling the effects of ocean and platform dynamics. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 38, 655-665.
- Porter, M. B. ve Buckner, H.P., 1987. Gaussian Beam Tracing for Computing Ocean Acoustic Fields. *Journal of Acoustical Society of America*, 82, 1348-1359.
- Qarabaqi, P ve Stojanovic, M., 2013a. Statistical Characterization and Computationally Efficient Modeling of a Class of Underwater Acoustic Communication Channels. *IEEE Journal Oceanic Engineering*, 38, 701-717.
- Qarabaqi, P. ve Stojanovic, M. 2013b., Acoustic Channel Simulator, <http://millitsa.coe.neu.edu/?q=projects>.
- Qarabaqi, P. ve Stojanovic, M., 2009. Statistical modeling of a shallow water acoustic communication channel, *Proceedings of 3rd underwater acoustic measurements conference*, June 2009, Nafplion, Greece, s. 1341-1350.
- Qarabaqi, P. ve Stojanovic, M., 2011. Modeling the large scale transmission loss in underwater acoustic channels, *Proceedings of 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, September 2011, Illinois, USA, s. 445-452.
- Radosevic, A., Proakis, J. ve Stojanovic, M., 2009. Statistical characterization and capacity of shallow water acoustic channels, *Proceedings of IEEE Oceans Europe Conference*, May 2009, Bremen, Germany, s. 1-8.
- Socheleau, F., Passerieux, J. ve Laot, C., 2009. Characterisation of timevarying underwater acoustic communication channel with application to channel capacity, *Proceedings of 3rd underwater acoustic measurements conference*, June 2009, Nafplion, Greece, s. 1-8.
- Stefanov, A. ve Stojanovic, M., 2011. Design and performance analysis of underwater acoustic networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 29, 2012-2021.
- Tamazin, M., Noureldin, A., Korenberg, M.J. ve Kamel, A.M., 2016. A New High-Resolution

- GPS Multipath Mitigation Technique Using Fast Orthogonal Search. *Journal of Navigation*, 69, 794-814.
- Tomasi, B., Casari, P., Badia, L. ve Zorzi, M., 2010. A study of incremental redundancy hybrid ARQ over Markov channel models derived from experimental data, *Proceedings of the 5th ACM International Workshop on UnderWater Networks*, October 2010, Massachusetts, USA, s. 1-8.
- United Nations, 2017. *The First Global Integrated Marine Assessment: World Ocean Assessment*: Cambridge University Press, 973 p.
- Wang, W. B. ve Yang, T.C., 2006. High-frequency channel characterization for -ary frequency-shift-keying underwater acoustic communications. *Journal of Acoustical Society of America*, 120, 2615-2626.
- Wang, Y., 2015. Linear least squares localization in sensor network. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 51, 1-7.
- Yang, J. ve Chen, Y., 2009. Indoor Localization Using Improved RSS-Based Lateration Methods, *Proceedings of the 28th IEEE conference on Global telecommunications*, November 2009, Hawaii, USA, s. 4506-4511.
- Zekavat, R. ve Buehrer, R.M., 2011. *Handbook of Position Location Theory Practice and Advances*: Wiley-IEEE Press, 1222 p.
- Zhang, J., Cross, J. ve Zheng, Y.R., 2010. Statistical channel modeling of wireless shallow water acoustic communications from experiment data, *Proceedings Military Communications Conference*, November 2010, California, USA, s. 2412-2416.
- Zhao, X., Pompili, D. ve Alves, J. 2017., Underwater Acoustic Carrier Aggregation: Achievable Rate and Energy-Efficiency Evaluation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42, 1035-1048.