

## Sualtı doğalgaz boru hatlarındaki sızıntıların konumlandırılmasının zaman ve frekans seçici akustik kanalda incelenmesi

### Investigation of positioning of the leakages in underwater natural gas pipelines in time and frequency selective acoustic channel

Yiğit MAHMUTOĞLU<sup>1\*</sup>, Kadir TÜRK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye.  
yigit.mahmutoglu@erdogan.edu.tr

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.  
kadir@ktu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 12.12.2018  
Kabul Tarihi/Accepted: 25.10.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 26.09.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.25307  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Önemli bir enerji kaynağı olan doğalgaz genelde sualtından da geçen doğalgaz boru hatları vasıtasıyla taşınmaktadır. Sualtı doğalgaz boru hatları korozyon ve gemi, balıkçılık faaliyetleri başta olmak üzere çeşitli nedenlerden dolayı delinebilir. Bu yüzden, sızıntıların algılanması ve konumlandırılması enerji güvenliğinin sağlanmasında ve doğal yaşamın korunmasında önemli bir role sahiptir. Bu çalışmada, sualtı doğalgaz boru hatlarındaki sızıntıların konumlandırılması için yeni bir yöntem olarak sinyal gücü tabanlı eğri uydurma yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin performansı, gerçek bir sualtı doğalgaz boru hattının parametrelerinin ve zamanla değişen (hareketli deniz yüzeyi, sualtı akıntıları vb. nedeniyle) çok yollu ikili seçici sualtı akustik kanalının kullanıldığı benzetim çalışmalarıyla analiz edilmiştir. Nümerik sonuçlar, oldukça gerçekçi olan bu zamanla değişen çok yollu sualtı akustik kanalda sızıntıların kilometrelerce uzaktan deniz dalga yüksekliği ve ortam gürültüsüne bağlı olarak düşük hatalarla konumlandırılabilceği gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Sualtı doğalgaz boru hattı, Pasif akustik konumlandırma, Alınan sinyal gücü, Gaz sızıntısı.

#### Abstract

Natural gas, which is an important energy source, is generally transported through natural gas pipelines that also pass through underwater. Underwater natural gas pipelines can be punctured for various reasons, especially for corrosion and shipping, fishing activities. Thus, detection and localization of the leakages has a crucial role in ensuring energy reliability and preserving the natural life. In this study, a novel signal strength based curve fitting method was proposed for positioning the leakages in the underwater natural gas pipelines. The performance of this method was analyzed by simulation studies using the parameters of a real life underwater natural gas pipeline and a time-varying (because of moving sea surface, underwater currents etc.) multipath doubly selective underwater acoustic channel. Numerical results show that for this time-varying multipath underwater acoustic channel, which is quite realistic, leakages can be positioned with low errors from kilometers away depending on the ambient noise and the sea wave height.

**Keywords:** Underwater natural gas pipeline, Passive acoustic localization, Received signal strength, Gas leakage.

## 1 Giriş

Doğalgaz üretildiği bölgelerden, tüketildiği yerlere kadar genellikle boru hatlarıyla taşınmaktadır. Bu boru hatlarının büyük bir bölümü de sualtında bulunmaktadır. Sualtı doğalgaz boru hatları (SDBH) yaşlanmaya bağlı iç ve dış korozyon ve balıkçılık faaliyetleri (gemi çapaları, trol ağları vb.) başta olmak üzere çeşitli nedenlerden dolayı delinebilir [1]. Bu yüzden SDBH'lerin sürekli olarak kontrol edilmesi ve sızıntı olması durumunda sızıntı yerinin hızlıca tespit edilip erkenden müdahalede bulunulması enerji güvenliğini sağlayıp kaynakların israf edilmesini engellemede ve çevre kirliliğinin önüne geçip doğal hayatı korumada önemli bir rol oynayacaktır.

Literatürde, SDBH'lerdeki sızıntıların tespit edilmesi ve/veya konumlandırılması ile ilgili bazı yöntemler mevcuttur [2]-[9]. Ancak, pasif akustik yöntem (PAY) hariç diğer yöntemlerin sızıntı konumlandırılmasında başarısızlık, yüksek maliyet, uzun boru hatları için kullanışsızlık, sualtı akıntı ve bulanıklıktan etkilenme ve zahmetli bakım ve onarım süreci gibi birçok dezavantajı vardır [3]. SDBH'lerdeki sızıntıların konumlandırılması için [4],[8],[9]'da alınan sinyal gücünü

kullanan pasif akustik tabanlı çeşitli yöntemler önerilmiştir. Ancak [4],[8] çalışmalarında sualtı akustik kanalı tek yollu (sadece direk yol sinyali) kabul edilmiştir. [9]'da ise gürültülü kanal modeline deniz yüzeyi ve taban yansıma etkileri kısmen dahil edilmiştir. [9]'da kullanılan kanal modeli sabit bir geometriye sahip olup deniz yüzeyinin zamanla değişimini ihmal etmiştir. Oysa gerçek sualtı akustik kanalı, verici/alıcı ve deniz yüzeyinin hareketliliği nedeniyle değişken geometriye, saçılım etkisine ve hareketli deniz yüzeyi sonucu oluşan Doppler kayma etkisine sahiptir.

Bu çalışmada, SDBH'lerdeki sızıntıların konumlandırılma problemi, Qarabaqi ve Stojanovic tarafından [10]'da önerilen, literatürde sıklıkla gerçekçi olarak kabul gören bir sualtı akustik kanal modeli için incelenmiştir. Akustik yayılımın birçok fiziksel özelliğinin göz önünde bulundurulduğu bu modelde deniz yüzeyinin zamanla değişim etkisi de modellenmiştir. Çok yollu bayılma etkisine sahip bu zamanla değişen kanalda sızıntı konumlandırma için [4],[8],[9]'daki yöntemler yetersiz kalmaktadır. Bu durumda konum tespitinin yapılabilmesi için kanalın çok yolluluk etkisiyle baş edilmesi gerekmektedir.

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

Literatürde, konumlandırma problemlerinde kanalın çok yolluluk etkisinin azaltılması için birçok yöntem önerilmiştir [11]-[17]. Konum tespit sistemlerinde, çok yollu kanal etkisinin azaltılması için kullanılan erken-eksi-geç gecikme kitlemeli çevrim, çift delta tekniği, gecikme kitlemeli çok yolluluk tahminçisi, evre-uyumsuz gecikme kitlemeli çok yolluluk tahminçisi, erken geç eğimi ve dalgacık analizi gibi birçok teknikte kanalı tanımak için vericiden alıcıya, alıcı tarafından bilinen bir eğitim dizisi gönderilmektedir [11]-[14]. Ancak, sızıntıdan alıcılara eğitim dizisi gönderme işlemi mümkün olmadığından ilgili yöntemler SDBH'lerdeki sızıntıların konumlandırılması için uygun değildir. [15],[16]'da, alınan sinyal gücü tabanlı konum tespitinde çok yollu kanal etkisinin azaltılması için frekans çeşitlemesi yöntemi kullanılmıştır. Frekans çeşitlemesi yönteminde gönderilmek istenen veri birden fazla sayıda taşıyıcı frekans kullanılarak gönderilir. Ancak sızıntı tabanlı akustik sinyalin frekansı sabit olduğundan ve sızıntı delik çapı veya boru hattı derinliği değişmediği sürece değişme ihtimali olmadığından, frekans çeşitlemesi yöntemi SDBH'lerdeki sızıntıların konumlandırılması için uygun değildir. Çok yollu sualtı kanalında pasif (akustik) hedef konumlandırılmayla ilgili olan [17]'de, deniz tabanı ve yüzeyinden dolayı oluşan çok yollu gecikmeler, kepstrum yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve bu çok yollu gecikmeler hedefi konumlandırmak için kullanılmıştır. Kepstrum yöntemi, alıcılara ulaşan sinyalin spektrumunun logaritmasının ters Fourier dönüşümünün alınması işlemi olup çok yollu kanaldan dolayı meydana gelen yansıma bileşenlerinin toplamsal olarak ifade edilmesini sağlar. Özellikle korozyon tabanlı etkilerde, SDBH zaman içinde yavaşça delineceğinden, sızıntı sinyalinin başlangıç kısımları (geçici durum) alıcı tarafından yakalanamayabilir. Bu durumda, alınan periyodik sinüs sinyalinden kepstrum yöntemiyle çok yollu gecikme bilgilerinin elde edilmesi mümkün olmaz ve sızıntı konumlandırılmaz.

Bu çalışmada, SDBH'lerdeki sızıntıların konumlandırılması için sinyal gücü tabanlı bir eğri uydurma yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde doğrusal olmayan en küçük kareler (DOEKK) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmaları kullanılarak konum tespiti yapılmıştır. İncelemelerde [10]'da önerilen gerçekçi sualtı akustik kanal modeli kullanılmıştır. Önerilen yöntemin ve algoritmaların başarımı farklı deniz dalga yükseklikleri ve ortam gürültüleri durumları için incelenmiştir.

## 2 Sualtı akustik kanalı ve ortam gürültüsü

### 2.1 Sualtı akustik kanalı

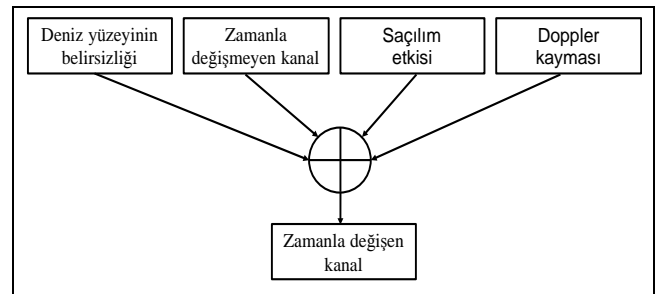
Sualtı ortamı bölgeden bölgeye değişiklik gösterdiği için literatürde hangi sualtı akustik kanal modelinin kullanılacağı konusunda bir fikir birliği bulunmamaktadır. Literatürde kullanılan bazı kanal modelleri takip eden şekilde verilmiştir. Işın teorisi tabanlı bir ışın izleme yazılımı olan Bellhop, sualtı akustik kanalını modellemiş ancak kanalın rastgele değişimlerini göz ardı etmiştir [18]. [19]'da, Bellhop modeline, sualtı akustik kanalının rastgele değişim etkilerinden birisi olan yüzey hareketlilik etkisi adapte edilmiştir. Ancak, yüksek rüzgar hızlarında [19]'da önerilen kanal modeli için elde edilen benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçları örtüşmemiştir. Diğer bir ışın izleme yazılımı olan Virtual Time Series Experiment (VirTEX) sualtı akustik kanalını istatistiksel olarak modellemiştir [20]. Ancak, yüksek hesaplama karmaşıklığına sahiptir. Sualtı akustik kanalını stokastik olarak modellemek için çok sayıda çalışma yapılmıştır [21]-[28]. Söz konusu çalışmalarda, belirli bölgelerden alınan akustik veriler (ölçümler) analiz edilerek kanal modelleri oluşturulmuştur. Bu çalışmaların bazılarında

alınan ölçümlerle Rician veya Rayleigh dağılımı uyum sağlarken, bazılarında log-normal dağılım ve K dağılımı uyum sağlamıştır. Yani ölçüm alınan denizlerin özellikleri birbirinden farklı olduğundan ilgili çalışmalarda farklı istatistiksel dağılımlarla uyum sağlayan kanal modelleri önerilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmalarda, belirli ortamlar için önerilen kanal modelleri farklı ortamlarda geçerli olmayabilir.

Literatürdeki diğer kanal modelleriyle [18]-[28] karşılaştırınca, sualtı akustik kanalını en gerçekçi biçimde modelleyen [10]'da, Qarabaqi ve Stojanovic zamanla değişen sualtı kanalını tanımlamak için kapsamlı bir matematiksel analiz yapmıştır. Bu tanımlamada frekansa bağımlı zayıflama, taban ve yüzey yansımaları, rastgele yer değiştirmeler ve buna bağlı olarak oluşan Doppler etkisi gibi akustik yayılım fiziksel özelliklerinin çoğu göz önünde bulundurulmuştur. [10]'da sualtı kanalındaki değişimler, alıcının/vericinin rastgele yer değiştirme (su akıntısı, sürüklenme, deniz yüzeyinin hareketliliği vb. nedenlerle) büyüklüğüne bağlı olarak küçük-ölçekli değişimler ve büyük-ölçekli değişimler olarak sınıflandırılmıştır. Saçılma ve hareket tabanlı Doppler etkilerini tanımlamak için kullanılan küçük-ölçekli değişimler anlık kanal tepesindeki hızlı değişimlerden sorumludur. Alınan ortalama sinyal gücünü etkileyen büyük-ölçekli değişimler ise değişen sistem geometrisine bağlı olarak oluşan konum belirsizliğini ve değişken çevresel koşulları tanımlamak için kullanılır. Diğer bir anlatımla, büyük-ölçekli değişimler yayılım yollarının kazanç ve gecikmelerinde büyük değişikliklere yol açan rastgele sistemsel yer değiştirmelerin bir sonucu olarak modellenmektedir. Özetlemek gerekirse, sabit geometriyi bir kanal (nominal kanal) içinde, vericiden gönderilen sinyaller alıcılara, farklı uzunluklara ve varış açılarına sahip yollardan ulaşacaktır. Büyük-ölçekli değişimler, her bir yayılım yol uzunluğunun nominal değerinden rastgele olarak sapmasına neden olurken, küçük-ölçekli değişimler her bir yayılım yolunun saçılarak belirli sayıdaki alt yollara ayrılmasına neden olur. Literatürde sıklıkla kullanılan ve blok diyagramı Şekil 1'de gösterilen bu kanalın transfer fonksiyonu Denklem (1)'de verilmiştir [29]-[31].

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

Burada,  $\bar{H}_0(f)$ ,  $p$ ,  $h_p$ ,  $\gamma_p(f)$  ve  $\tau_p$  sırasıyla referans yol için transfer fonksiyonu, yol sayısı, yol kazancı, saçılma katsayısı ve yol gecikmesidir. Değişkenler hakkındaki detaylı bilgiler ve eşitlikler [10]'da verilmiştir.



Şekil 1. [10]'da önerilen sualtı akustik kanal modelinin blok diyagramı.

Figure 1. Block diagram of the underwater acoustic channel model which is proposed in [10].

[10]'da önerilen analitik kanal modeli deneysel çalışmalarla doğrulanarak, ilgili çalışmanın yazarları tarafından [32]'deki

sualtı akustik kanal simülasyonu geliştirilmiştir. Bu simülasyonda, büyük-ölçekli benzetimler için ses hızının sabit ve deniz yüzeyinin/tabanının düzgün kabul edildiği basitleştirilmiş ışın izleme yazılımı veya alternatif olarak Bellhop ışın izleme yazılımı sunulmuştur. Küçük-ölçekli benzetimler için ise direkt model veya alternatif olarak istatistikî denk model sunulmuştur.

## 2.2 Sualtı ortam gürültüsü

Sualtı ortam gürültü kaynakları genelde Gauss dağılımlı olup sürekli bir güç spektral yoğunluğuna (GSY) sahiptir [33]. Denizde ortam gürültüsünü modellemek için kullanılan dört ana kaynak türbülans ( $N_t$ ), gemi ( $N_s$ ), dalga ( $N_w$ ) ve termal ( $N_{th}$ ) gürültülerdir. Denklem (2)-(5)'te bu gürültülerin GSY'lerinin ampirik formülleri dB re  $1\mu\text{Pa}/\text{Hz}$  cinsinden, frekansın (kHz cinsinden) bir fonksiyonu olarak verilmiştir [33].

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

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

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

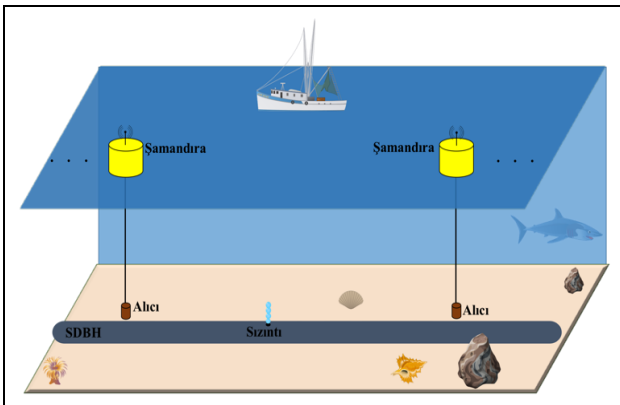
$$10\log_{10} N_{th}(f) = -15 + 20\log_{10}(f_0) \quad (5)$$

Burada,  $w$  m/sn. cinsinden rüzgâr hızı ve  $s$  gemi aktivite faktörüdür ( $0 \leq s \leq 1$ ). Ortam gürültüsünün toplam GSY'si Denklem (6)'da verilmiştir.

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

## 3 Sızıntı konumlandırma yöntemi

Şekil 2'deki gibi oluşturulan konum tespit sisteminde, alıcıların deniz yüzeyinde birbirine eşit uzaklıkta bulunan değişik sayıdaki şamandıralardan SDBH'ye çok yakın bir derinliğe sarkıtıldıkları varsayılmıştır. Bu alıcılar vasıtasıyla alınan akustik basınç sinyallerinin, karada bulunan ana merkeze gönderildiği ve burada önerilen yöntem kullanılarak sızıntının konumlandırıldığı varsayılmıştır. SDBH'lerin derinliği bilindiğinden ve çapları konumlandırma hatalarının büyüklüğü yanında ihmal edilebilecek ölçüde küçük olduğundan dolayı üç boyutlu konumlandırma problemi tek boyuta (sadece boru hattının boyu eksenini) indirgenebilir. Bu nedenle, bu çalışmada tek boyutlu konum tespiti yapılmıştır.



Şekil 2. Konum tespit sistemi.

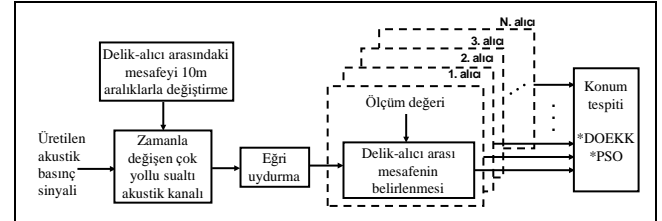
Figure 2. Localization system.

Alıcı taraftaki (alınan) akustik basınç sinyalleri, sualtı akustik kanalı ve sızıntı delik çapına bağlı, belirli bir frekansa sahip sinüzoidal işaretlerdir. Bundan dolayı, [4] çalışmasına benzer olarak, SDBH'deki sızıntıdan dolayı oluşan akustik basınç sinyalinin mevcut olabileceği tüm spektrum, alıcı tarafta (dar bantlı) 3 Hz'lik bant geçiren filtrelerden geçirilerek taranır. Böylece, belirlenen sinyalin frekansı, nümerik sonuçlar bölümünde verilen parametreler [4]'te verilen ilgili eşitlikler ve Denklem (7) kullanılarak sızıntı tabanlı akustik basınç sinyalinin delikten çıkış gücü bulunabilir. Bundan sonra, filtrelenen sinyallerin güçlerinin bir müddet için ortalaması alınarak ortam gürültüsünün tesiri azaltılır.

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

Burada,  $P$ ,  $\delta$ ,  $\vartheta$ ,  $P_0$ ,  $t$ ,  $B$ ,  $f_0$  ve  $\tau_i$  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 [4]'te verilmiştir.

Delikten çıkan sinyalin gücünün ve alınan sinyallerin güçlerinin bilinmesine rağmen değişken kanaldaki konum belirsizlikleri, saçılma ve hareketli deniz yüzeyinin neden olduğu bayılma etkisi azaltılmadan sızıntı delik konumunun düşük hatalarla tespit etmek mümkün değildir. Bu durumda sızıntıyı konumlandırmak için Şekil 3'te verilen yöntem önerilmiş ve aşağıda gibi anlatılmıştır. Bu yöntemde alıcılar tarafından alınan sinyallere yukarıda anlatılan filtreleme ve gürültü etkisini azaltma işlemleri uygulanır.



Şekil 3. Önerilen yöntemin blok diyagramı.

Figure 3. Block diagram of the proposed method.

Yöntemde ilk olarak, sızıntı deliği-alıcı arası mesafe tüm SDBH'yi kapsayacak şekilde kısa aralıklarla değiştirilerek her mesafe için (sinyalin delikten çıkış gücü hesaplanabildiğinden ve kanal modeli bilindiğinden) alıcılara ulaşması gereken gürültüsüz ve kanal modeline göre zamanla değişen sinyallerin güçlerinin zamana göre ortalamaları hesaplanıp kaydedilir. Ancak delik-alıcı arasındaki mesafe arttıkça düzenli olarak azalması gereken alınan ortalama sinyal gücü, kanalın bayılma etkisinden dolayı düzensiz bir azalma (toplamda azalan ancak aralarda artış ve azalış şeklinde dalgalanma gösteren) gösterir. Yüksek konumlandırma hatalarına neden olan bu düzensiz azalmayı düzenli bir hale getirmek için kaydedilen ortalama sinyal gücü ve delik-alıcı arası mesafe veri seti (eğrisi), Gauss modeline uydurulur. Sonrasında, konumu bilinmeyen bir delik için alıcılar tarafından alınan ortalama sinyal güçlerinin, uydurulmuş olan eğrideki değerlerine karşılık düşen mesafe değerleri söz konusu delik ile alıcılar arasındaki mesafeler olarak belirlenir. Son olarak ise DOEKK ve PSO algoritmaları kullanılarak sızıntı deliğinin konumu tespit edilir.

Tek boyutlu uzayda  $x$  bilinmeyen delik konumu ve  $x_z$  ( $z = 1, 2, \dots, m$ ) bilinen alıcı konumları olmak üzere delik-alıcı arası mesafe  $d_z = \sqrt{(x_z - x)^2}$  ile ifade edilir. Eğri yardımıyla bulunan delik-alıcı arasındaki mesafe  $\hat{d}_z$  olmak üzere, DOEKK

algoritmasıyla bilinmeyen delik konumu Denklem (8)'deki maliyet fonksiyonunun minimize edilmesiyle bulunabilir.

$$J(\hat{x}) = \sum_{z=1}^m \left( \hat{d}_z - \sqrt{(x_z - \hat{x})^2} \right)^2 \quad (8)$$

Minimizasyon işlemini gerçekleştirmek için burada, düşük hesaplama karmaşıklığından dolayı literatürde sıklıkla tercih edilen en dik iniş yöntemi (steepest descent method) kullanılmıştır. Bu yöntemle göre  $\hat{x}$  Denklem (9) kullanılarak bulunabilir.

$$\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k - \mu \nabla (J(\hat{x}^k)) \quad (9)$$

Burada  $k$  yineleme sayısı,  $\mu$  adım büyüklüğü ve  $\nabla(\cdot)$  gradyan vektörüdür.  $\nabla(J(\hat{x}))$  Denklem (10)'da verilmiştir. En dik iniş yönteminin durma kriteri olarak yineleme sayısı seçilmiştir.

$$\nabla(J(\hat{x})) = \frac{\partial J(\hat{x})}{\partial \hat{x}} = \sum_{z=1}^m 2(x_z - \hat{x}) \left( \frac{d_z}{\sqrt{(x_z - \hat{x})^2}} - 1 \right) \quad (10)$$

Popülasyon temelli bir optimizasyon algoritması olan PSO, sürü olarak adlandırılan belirli sayıda çözümle (parçacıkla) başlatılır ve parçacıklar güncellenerek en uygun çözüm bulunmaya çalışılır. Sürüdeki bütün parçacıklar rastgele değerler olarak çözüm uzayında arama işlemine başlarlar. Her parçacık hız ( $v$ ) ve konum ( $p$ ) vektörü olmak üzere iki vektörel bileşene sahip olup bu vektörlerin boyutu çözülmek istenen problemdeki değişken sayısına bağlıdır. Hız vektörü parçacığın yön bilgisini ve konum değiştirme miktarını saklarken, konum vektörü parçacığın konum bilgisini saklar. Bir parçacığın hız vektörü, parçacığın daha evvelki yinelemelerde kazandığı tecrübeden ( $pbest$ , yerel en iyi) ve sürünün genel tecrübesinden ( $gbest$ , küresel en iyi) faydalanılarak Denklem (11)'e göre hesaplanır. Konum vektörü ise Denklem (12)'ye göre hesaplanır.

$$v_{jb}^{k+1} = wa^k v_{jb}^k + c_1 r_1^k (pbest_{jb}^k - p_{jb}^k) + c_2 r_2^k (gbest^k - p_{jb}^k) \quad (11)$$

$$p_{jb}^{k+1} = p_{jb}^k + v_{jb}^{k+1} \quad (12)$$

Burada,  $c_1$  ve  $c_2$ , parçacıkları  $pbest$  ve  $gbest$  konumlarına doğru yönlendiren öğrenme faktörleridir.  $r_1$  ve  $r_2$  ise 0-1 arasında düzgün dağılıma sahip rastgele değişkenlerdir.  $j$  parçacık indisini,  $k$  yineleme indisini ve  $b$  problem boyutunu ifade etmektedir.  $wa$  atalet ağırlık katsayısıdır. En iyi başarımın elde edilmesi için atalet ağırlık katsayısının 0.9'dan 0.4'e kadar kademeli bir şekilde indirilmesi gerekmektedir [34].

PSO algoritmasıyla bilinmeyen delik konumu takip eden şekilde bulunabilir.

- 1- Oluşturulan parçacıklar tanımlanan problem uzayında (SDBH boyunca) rastgele konumlandırılır,
- 2- Denklem (13)'teki maliyet fonksiyonu kullanılarak parçacıkların uygunluk değerleri hesaplanır,
- 3- Parçacıkların mevcut konumları  $pbest_j$  olarak atanır ve  $gbest$  belirlenir,

- 4- Parçacıkların hızları ve konumları Denklem (11) ve (12)'ye göre güncellenir,
- 5- Çözüm uzayı dışına çıkan parçacık (parçacıklar) varsa bunların konumunun çözüm uzayı içerisinde olacak şekilde ayarlanır,
- 6- Parçacıkların yeni konumları için uygunluk değerleri Denklem (13)'e göre hesaplanır ve  $pbest_j$  ve  $gbest$  güncellenir,
- 7- Belirlenmiş olan adım sayısına ulaşıncaya kadar işlemler 4. basamaktan itibaren sürdürülür.

$$J(p_j = \hat{x}_j) = \sum_{z=1}^m \left( \hat{d}_z - \sqrt{(x_z - \hat{x}_j)^2} \right)^2 \quad (13)$$

#### 4 Benzetim sonuçları

Önerilen yöntemin konumlandırma başarımını değerlendirmek için yapılan benzetim çalışmalarında, 400 m derinlikte bulunan ve 136 m<sup>3</sup>/sn'lik gaz akış hızına sahip olan gerçek bir SDBH'nin (Cebelitarık boğazından geçip Cezayir'den İspanya'ya gaz taşımaktadır) 10 km'lik kısmı örnek olarak ele alınmıştır [35]. Aşağıda verilen parametre değerleri, [4]'te detaylandırılmış olan eşitlikler ve Denklem (7) kullanılarak baloncukların sürekli bir dizisi için akustik basınç sinyali üretilmiştir.  $g$  (yer çekimi ivmesi),  $h$  (derinlik),  $\rho$  (deniz suyunun yoğunluğu),  $\kappa$  (özel ısı oranı),  $\tau$  (ardışık baloncuklar arasındaki zaman gecikmesi),  $d_{ref}$  (referans mesafe),  $d_{delik}$  (sızıntı deliğinin çapı),  $S$  (baloncuk yüzey gerilmesi) ve  $Q$  (gaz akış hızı) parametrelerinin değerleri sırasıyla 9.8 m/sn<sup>2</sup>, 400 m, 1000 kg/m<sup>3</sup>, 1.49, 19.75 ms, 1 m, 1 mm, 0.07423 N/m ve 136 m<sup>3</sup>/sn'dir.

Bu çalışmada, [32]'de geliştirilen sualtı akustik kanal simülatörü kullanılmıştır. Söz konusu simülatörde, büyük-ölçekli benzetimler için ses hızının sabit ve deniz yüzeyinin/tabanının düzgün kabul edildiği basitleştirilmiş ışın izleme yazılımı veya alternatif olarak Bellhop ışın izleme yazılımı sunulmuştur. Küçük-ölçekli benzetimler için ise direk model veya alternatif olarak istatistikî denk model sunulmuştur. Bellhop ışın izleme yazılımında, belirli bir ses hızı profili (derinliğe bağlı olarak ses hızının değişimi) ve belirli bir deniz taban yapısı için ışın izleme işlemi yapılmaktadır. Ancak, ses hızı profili ve deniz taban yapısı bölgesel farklılıklar gösterdiğinden belirli bir bölge için yapılan ışın izleme işlemi farklı bir bölge için doğru olmayacaktır. Bundan dolayı, burada daha genel olması açısından büyük-ölçekli benzetimler için hesaplama karmaşıklığı daha yüksek olan Bellhop yerine, [30]'da da kullanılan basitleştirilmiş ışın izleme yazılımı ve küçük-ölçekli benzetimler için direk model kullanılmıştır.

Sualtı akustik kanal simülatöründe kullanılan parametre değerleri Tablo (1) ve (2)'de verilmiştir.

Kesim faktörü, alınan ışın sayısına bir sınırlama getirmek için kullanılmıştır. Direkt gelen sinyalin gücü kesim faktörüne bölünerek, gücü bu değer altında olan sinyaller ihmal edilmiştir Küçük-ölçekli benzetim parametrelerinin tüm yollar için sabit olduğu varsayılmıştır. Büyük-ölçekli değişimler, deniz derinliği ve deniz yüzey yüksekliği değişim aralığının toplamıyla sınırlandırılmıştır. Bu parametrelerin kullanıldığı kanal model denklemleri [10]'da detaylı olarak anlatılmıştır.



Tablo 1. Kanal ve yüzey dalga parametreleri.

Table 1. Channel and surface wave parameters.

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

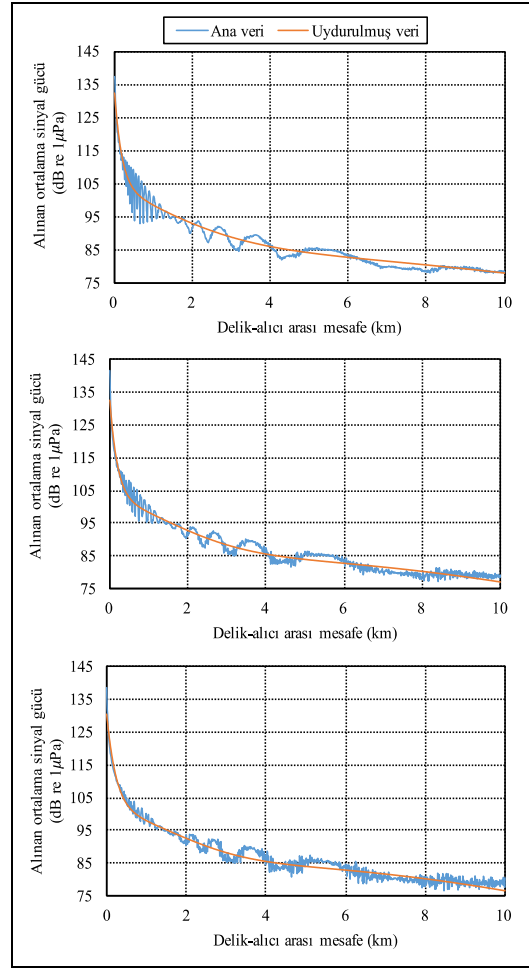
Tablo 2. Büyük-ölçekli ve küçük-ölçekli benzetim parametreleri.

Table 2. Large-scale and small-scale simulation parameters.

Parametre	Değer
Toplam benzetim sinyali süresi	80 sn.
Deniz yüzey yüksekliğinin değişim aralığı	[-10 10]m
Alıcı yüksekliğinin değişim aralığı	[0 5] m
Kanal mesafesinin değişim aralığı	[-20 20] m
Deniz yüzey yüksekliğinin büyük-ölçek değişimlerinin standart sapması	1
Alıcı yüksekliğinin büyük-ölçek değişimlerinin standart sapması	1
Kanal mesafesinin büyük-ölçek değişimlerinin standart sapması	1
Büyük-ölçekli değişimleri üretmek için kullanılan AR parametresi	0.9
Küçük-ölçekli yüzey değişimlerinin varyansı	1.125
Küçük-ölçekli taban değişimlerinin varyansı	0.5625
Küçük ölçekli değişimler için bağdaşım zamanı	40 sn.
Alt yol gecikmelerinin güç spektral yoğunluklarının 3-dB genişliği	0.0005
Alt yol sayısı	20
Alt yol genliklerinin ortalaması	0.025
Alt yol genliklerinin varyansı	0.000006

1 m, 3 m ve 5 m dalga yükseklikleri (ele alınan SDBH'nin bulunduğu coğrafik koşullara uygun olarak seçilmiştir) için sızıntı deliği-alıcı arasındaki mesafe 0-10 km arasında 10 m aralıklarla değiştirilerek, alınan gürültüsüz ve kanal modeline göre zamanla değişen sinyallerin güçlerinin zamana göre ortalamaları hesaplanmıştır. Böylece, ortalama sinyal gücü-mesafe veri setleri elde edilmiştir. Bu veri setleri üç terimli Gauss modeline uydurulmuştur. 1 m, 3 m ve 5 m dalga yükseklikleri için elde edilen (ana) veri setleri ve uydurulmuş eğriler Şekil 4'te gösterilmiştir. DOEKK algoritmasında, en dik iniş yöntemi için başlangıç değeri, adım büyüklüğü ve yineleme sayısı sırasıyla  $\hat{x}^0=5000$  m,  $\mu=0.01$  ve 100 olarak alındı. PSO algoritmasında, parçacık sayısı, yineleme sayısı, problem boyutu, en büyük atalet katsayısı, en küçük atalet katsayısı ve öğrenme faktörleri sırasıyla 100, 100,  $b=1$ ,  $w_{amak}=0.9$ ,  $w_{amin}=0.4$  ve  $c_1=2$ ,  $c_2=2$  olarak alınmıştır. Monte Carlo (MC) deneme sayısı 1000 olarak alınmıştır. Alıcılardaki ortam

gürültüsü 3 Hz bant genişliği için hesaplanmıştır. Delik konumu 10 m aralıklarla 0-10 km arasında değiştirilmiştir. Alıcı sayısı 4 ve alıcı konumları (2, 4, 6, 8) km olarak alınmıştır.

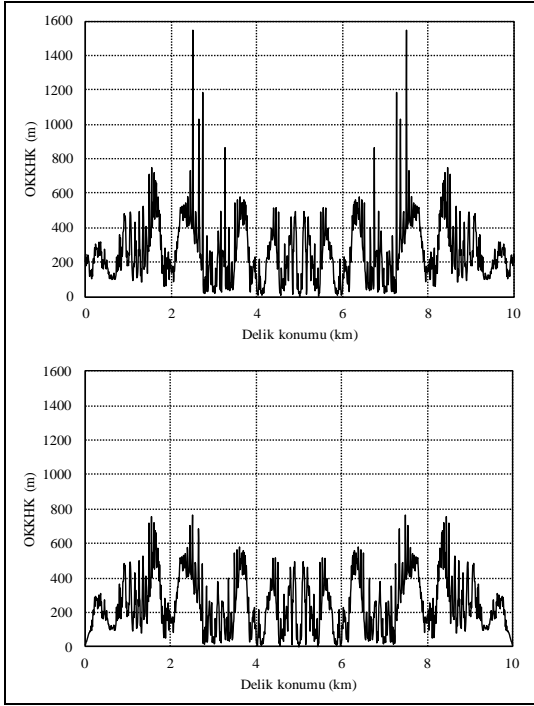


Şekil 4. 1 m (üst), 3 m (orta) ve 5 m (alt) dalga yükseklikleri için elde edilmiş ve üç terimli Gauss modeline göre uydurulmuş veri setleri.

Figure 4. Data sets, which are obtained for 1 m (top), 3 m (middle) and 5 m (bottom) wave heights and fitted to three term Gauss model.

Yöntemin başarımı farklı ortam gürültüleri ve dalga yükseklikleri için incelenmiştir. Bu çalışmada,  $N_1, N_2, N_3, N_4$  ve  $N_5$  olmak üzere, Bölüm 2.2'de değinilen bütün gürültü bileşenlerini içeren beş değişik ortam gürültüsü ele alınmıştır. Bu ortam gürültüleri için gözlenen deniz durumları ile rüzgar hızları arasındaki ilişkiyi gösteren Beaufort skalası 8 (19 m/sn. rüzgar hızı) [4] ve gemi aktivite faktörleri yukarıda anılan ortam gürültülerinin sırasına göre 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ve 1 olarak alınmıştır.  $N_1, N_2, N_3, N_4$  ve  $N_5$  ortam gürültülerinin güçleri sırasıyla 80.75, 83.87 87.46, 91.3 ve 97.2 dB re  $1\mu\text{Pa}$ 'dır.

Şekil 5'te her iki algoritma, 1 m dalga yüksekliği ve  $N_3$  ortam gürültüsü için sızıntı delik konumu ile ortalama karesel konum hatasının karekökü (OKKHK) arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Burada, beklendiği üzere 0-5 km ve 5-10 km aralıklarındaki OKKHK'ler arasında bir simetri vardır. Grafikte OKKHK değerlerindeki ani azalış ve artışlar kanalın bayılma etkisinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5. DOEKK (üst), PSO (alt) algoritmaları, 1 m dalga yüksekliği ve  $N_3$  ortam gürültüsü için sızıntı delik konumu ile OKKHK arasındaki ilişkiler.

Figure 5. Relationships between leak hole position and OKKHK for DOEKK (top), PSO (bottom) algorithms, 1 m wave height and  $N_3$  ambient noise.

Şekil 6'da sırasıyla 1 m, 3 m ve 5 m dalga yükseklikleri için gemi aktivite faktörü ve 0-10 km arasında 10 m aralıklarla değiştirilen delik konumları için elde edilen OKKHK'lerin ortalamaları arasındaki ilişkiler her iki algoritmalar için gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere PSO'nun konumlandırma başarımı DOEKK'den en az 3 m ve en fazla 18 m daha yüksektir. Şekilde görüldüğü gibi, artan gemi aktivite faktörü (ortam gürültü gücü) konumlandırma doğruluğunu azaltmaktadır. DOEKK için en düşük ve en yüksek gemi aktivite faktörlerinin ele alınması durumunda, konumlandırma hataları arasındaki fark dalga yüksekliğine bağlı olarak en fazla 65 m ve en az 52 m olmaktadır. PSO için en düşük ve en yüksek gemi aktivite faktörlerinin ele alınması durumunda, konumlandırma hataları arasındaki fark dalga yüksekliğine bağlı olarak en fazla 57 m ve en az 42 m olmaktadır. Ayrıca, dalga yüksekliğinin konumlandırma performansını ciddi ölçüde etkilediği görülmektedir.

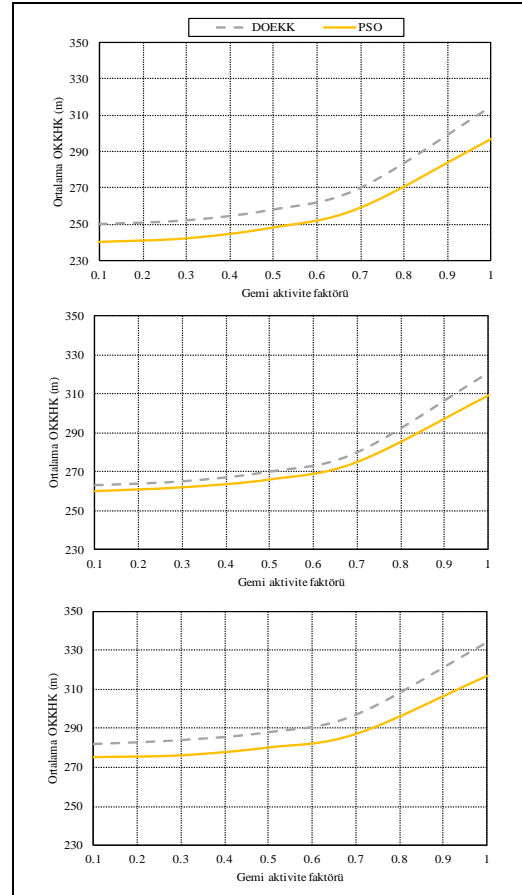
$N_1$ ,  $N_3$ ,  $N_5$  ortam gürültüleri, 5 m dalga yüksekliği ve her iki algoritma için konum hatası ve olasılık yoğunluğu arasındaki ilişkiler Şekil 7'de gösterilmiştir. Tablo 3'te 1 m, 3 m ve 5 m dalga yükseklikleri,  $N_1$ ,  $N_3$ ,  $N_5$  ortam gürültüleri ve DOEKK, PSO algoritmaları için konum hatalarının 500 m'den düşük olma olasılıkları verilmiştir. Şekil 7'de yani en düşük konumlandırma başarımlarının elde edildiği durumda (5 m dalga yüksekliği için) DOEKK için hatanın 500 m'den düşük olma olasılığı %87.4-%83.21 arasında değişmektedir. PSO için ise bu oran %88.32-%84.5 arasında değişmektedir. PSO algoritmasının konumlandırma başarımının DOEKK algoritmasından daha iyi olmasına rağmen DOEKK'nın hesaplama yükü PSO'ya göre çok daha düşüktür. Ancak uygulama açısından bakıldığında, alıcılar vasıtasıyla alınan akustik basınç sinyallerinin, konumlandırma

için karada bulunan ana merkeze gönderildiği ve burada önerilen yöntemin kullanıldığı düşünüldüğünden hesaplama karmaşıklığı herhangi bir dar boğaz oluşturmamaktadır. PSO yöntemi standart bir bilgisayarda rahatlıkla uygulanabilmektedir.

Tablo 3. 1 m, 3 m ve 5 m dalga yükseklikleri,  $N_1$ ,  $N_3$ ,  $N_5$  ortam gürültüleri ve DOEKK, PSO algoritmaları için konum hatalarının 500 m'den düşük olma olasılıkları.

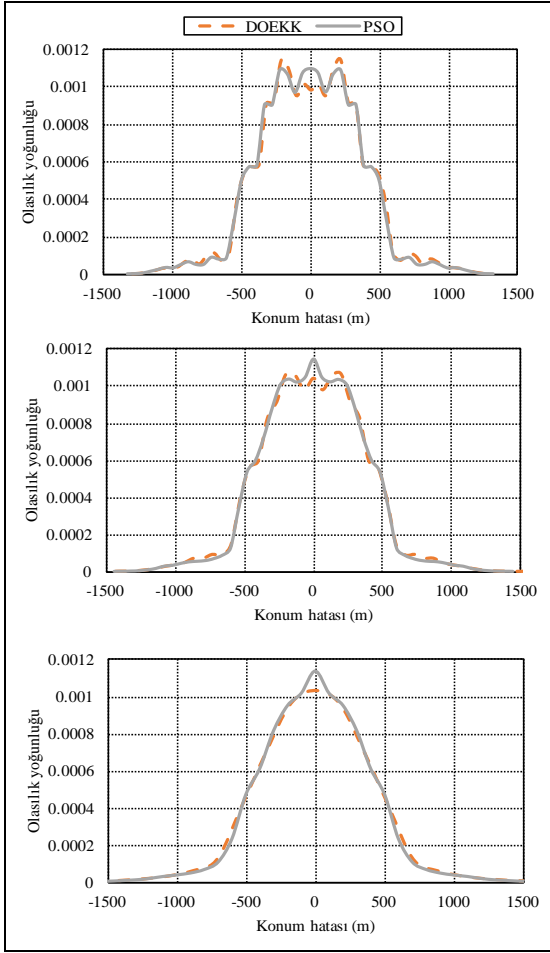
Table 3. Possibility of location errors less than 500 m for 1 m, 3 m and 5 m wave heights,  $N_1$ ,  $N_3$ ,  $N_5$  ambient noise and DOEKK, PSO algorithms.

	Gürültü	DOEKK	PSO
Aw=1 m	$N_1$	%92.12	%92.53
	$N_3$	%91.19	%91.60
	$N_5$	%86.18	%86.90
Aw=3 m	Gürültü	DOEKK	PSO
	$N_1$	%89.11	%89.21
	$N_3$	%88.60	%88.71
Aw=5 m	Gürültü	DOEKK	PSO
	$N_1$	%87.40	%88.32
	$N_3$	%87.04	%88.00
	$N_5$	%83.21	%84.50



Şekil 6. 1 m (üst), 3 m (orta) ve 5 m (alt) dalga yükseklikleri ve tüm algoritmalar için gemi aktivite faktörü ve ortalama OKKHK arasındaki ilişkiler.

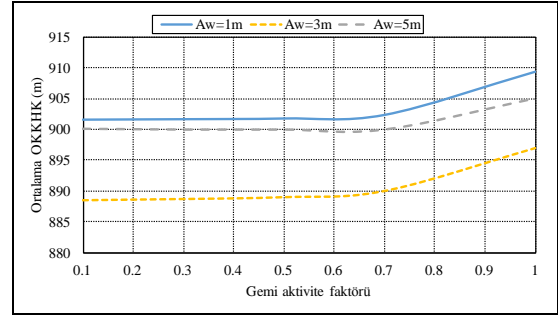
Figure 6. Relationship between shipping activity factor and average OKKHK for 1 m (top), 3 m (middle) and 5 m (bottom) wave heights and all of the algorithms.



Şekil 7. 5 m dalga yüksekliği durumunda  $N_1$  (üst),  $N_3$  (orta),  $N_5$  (alt) ortam gürültüleri ve her iki algoritma için konum hatası ve olasılık yoğunluğu arasındaki ilişkiler.

Figure 7. Relationships between localization error and probability density for 5 m wave height,  $N_1$  (top),  $N_3$  (middle),  $N_5$  (bottom) ambient noise and both algorithms.

Sualtı doğalgaz boru hatlarındaki sızıntıların çok yollu sualtı akustik kanallarında konumlandırılmasıyla ilgili literatürdeki tek çalışma [9]'dur. Ancak söz konusu çalışmada sadece deniz tabanı ve yüzeyinden olan yansıma etkileri kısmen göz önünde bulundurulup, gerçekçi bir sualtı akustik kanalında olması gereken deniz yüzeyinin hareketlilik etkisi, verici/alıcı hareketliliği, saçılım etkisi ve Doppler kayma etkileri ihmal edilmiştir. [9] No.lu çalışmada önerilen yöntem ve kanal kullanılarak elde edilen alınan ortalama sinyal gücü değerleri ve bizim çalışmamızdaki gerçekçi kanal kullanılarak elde edilen alınan ortalama sinyal gücü değerleri kullanılarak 1 m, 3 m ve 5 m dalga yükseklikleri için ortalama OKKHK'ların gemi aktivite faktörüne göre değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Buradan görüldüğü üzere hatalar yaklaşık olarak 885-900 m arasındadır. [9] çalışmasında önerilen yöntem sızıntıyı, bizim önerdiğimiz yöntemle göre yaklaşık 600-635 m arasında değişen hatalarla daha kötü konumlandıracaktır. [9] çalışmasında önerilen yöntem için hatanın 500 m'den düşük olma olasılığı %44.48-%46.41 arasında değişmektedir.



Şekil 8. 1 m, 3 m ve 5 m dalga yükseklikleri ve [9] çalışmasında önerilen yöntem için gemi aktivite faktörü ve ortalama OKKHK arasındaki ilişkiler.

Figure 8. Relationships between shipping activity factor and average OKKHK for 1 m, 3 m and 5 m wave heights and the proposed method in [9].

## 5 Sonuçlar

Bu çalışmada, SDBH'lerdeki sızıntıların konumlandırılması için sinyal gücü tabanlı eğri uydurma yöntemi önerilmiştir. Yöntemin başarımını değerlendirmek için gerçek hayatta kullanılan bir boru hattı göz önüne alınmıştır. Bu yöntemde doğrusal olmayan en küçük kareler (DOEKK) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmaları kullanılarak konumlandırma yapılmıştır. Benzetimlerde [10]'da önerilen çiftli seçici sualtı akustik kanal modeli kullanılmıştır. Benzetim sonuçları, 10 km uzunluğundaki bu SDBH'deki sızıntının farklı dalga yüksekliği ve ortam gürültüsü durumlarında DOEKK ve PSO algoritmaları için sırasıyla %83.21 ile %92.12 ve %84.5 ile %92.53 arasında değişen olasılıklarla 500 m'den düşük hatalarla konumlandırma yapılabileceği gösterilmiştir.

## 6 Conclusions

In this study, the signal strength based curve fitting method is proposed for positioning leakages in underwater natural gas pipelines. To assess the performance of the method, a pipeline used in real life is considered. In this method leakages are located by using nonlinear least squares (DOEKK) and particle swarm optimization (PSO) algorithms. In simulations double selective realistic underwater acoustic channel model, which is proposed in [10], is used. Simulation results showed that for various wave height and ambient noise scenarios the leakage on this 10 km long pipeline can be positioned for DOEKK and PSO algorithms with errors of less than 500 m with probabilities ranging from %83.21 to %92.12 and %84.5 to %92.53, respectively.

## 7 Kaynaklar

- [1] United Nations. *The First Global Integrated Marine Assessment: World Ocean Assessment*. 1<sup>st</sup> ed. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2017.
- [2] Barbagelata A, Barbagelata, L. "New acoustic leak system saves Money offshore". *Pipeline Gas Journal*, 231(11), 42-44, 2004.
- [3] Det Norske Veritas. "Selection and Use of Subsea Leak Detection Systems". Recommended Practice Det Norske Veritas DNV-RP-F302, Veritasveien, Norway, 2010.
- [4] Mahmutoglu Y, Turk K. "A passive acoustic based system to locate leak hole in underwater natural gas pipelines". *Digital Signal Processing*, 76, 59-65, 2018.

- [5] Thodi P, Paulin M, DeGeer D, Lanan G. "Offshore pipeline leak detection technologies for arctic applications". *Subsea and Arctic Leak Detection Symposium*, Houston, USA, 5-6 December 2012.
- [6] Zhang J. "Designing a cost effective and reliable pipeline leak detection system". *Pipeline Reliability Conference*, Houston, USA, 19-22 November 1996.
- [7] Murvay P, Silea I. "A survey on gas leak detection and localization techniques". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(6), 966-973, 2012.
- [8] Mahmutoglu Y, Turk K. "Remote leak hole localization for underwater natural gas pipelines". *40th Telecommunications and Signal Processing Conference*, Barcelona, Spain, 5-7 July 2017.
- [9] Mahmutoglu Y, Turk K. "Localization of leakages in underwater natural gas pipelines for multipath propagation". *26th Signal Processing and Communications Application Conference*, Izmir, Turkey, 2-5 May 2018.
- [10] Qarabaqi P, Stojanovic M. "Statistical Characterization and Computationally Efficient Modeling of a Class of Underwater Acoustic Communication Channels". *IEEE Journal Oceanic Engineering*, 38(4), 701-717, 2013.
- [11] Bhuiyan MZH, Lohan ES. "Advanced multipath mitigation techniques for satellite-based positioning applications". *International Journal of Navigation and Observation*, 2010, 1-15, 2010.
- [12] Tamazin M, Noureldin A, Korenberg MJ, Kamel AM. "A New High-Resolution GPS Multipath Mitigation Technique Using Fast Orthogonal Search". *Journal of Navigation*, 69, 794-814, 2016.
- [13] Marx M, Kokozinski R, Müller HC. "Time Synchronization for Real Time Localization Systems with Multi Path Mitigation". *IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning and RFID*, Cavtat, Croatia, 24-25 September 2009.
- [14] Aram M, El-Rabbany A, Krishnan S, Anpalagan A. "Single Frequency Multipath Mitigation Based On Wavelet Analysis". *Journal of Navigation*, 60, 281-290, 2007.
- [15] Ladha C, Sharif BS, Tsimenidis CC. "Mitigating propagation errors for indoor positioning in wireless sensor networks". *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, Pisa, Italy, 8-11 October 2007.
- [16] Lazaro A, Girbau D, Moravek P, Villarino R. "A study on localization in wireless sensor networks using frequency diversity for mitigating multipath effects". *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 19(13), 82-87, 2013.
- [17] Li-Jun C, Xiang G, Liang A. "Multipath passive localization in shallow water channel". *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 48(5), 609-615, 2012.
- [18] Porter MB, Bucker HP. "Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields". *Journal of Acoustical Society of America*, 82(4), 1348-1359, 1987.
- [19] Heitsenrether RM, Badiy M. "Modeling acoustic signal fluctuations induced by sea surface roughness". *Proceedings of High Frequency Ocean Acoustics Conference (AIP Conference)*, California, USA, 1-5 March 2004.
- [20] Peterson JC, Porter MB. "Ray/beam tracing for modeling the effects of ocean and platform dynamics". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 38(4), 655-665, 2013.
- [21] Qarabaqi P, Stojanovic M. "Statistical modeling of a shallow water acoustic communication channel". *Proceedings of 3rd underwater acoustic measurements conference*, Nafplion, Greece, 21-26 June 2009.
- [22] Radosevic A, Proakis J, Stojanovic M. "Statistical characterization and capacity of shallow water acoustic channels". *Proceedings of IEEE Oceans Europe Conference*, Bremen, Germany, 11-14 May 2009.
- [23] Socheleau F, Passerieux J, Laot C. "Characterisation of time-varying underwater acoustic communication channel with application to channel capacity". *Proceedings of 3rd Underwater Acoustic Measurements Conference*, Nafplion, Greece, 21-26 June 2009.
- [24] Galvin R, Coats REW. "A stochastic underwater acoustic channel model". *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS Conference*, Florida, USA, 23-26 September 1996.
- [25] Qarabaqi P, Stojanovic M. "Modeling the large scale transmission loss in underwater acoustic channels". *Proceedings of 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, Illinois, USA, 28-30 September 2011.
- [26] Tomasi B, Casari P, Badia L, Zorzi M. "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*, Massachusetts, USA, September 30-October 10 2010.
- [27] Wang WB, Yang TC. "High-frequency channel characterization for-ary frequency-shift-keying underwater acoustic communications". *Journal of Acoustical Society of America*, 120(5), 2615-2626, 2006.
- [28] Zhang J, Cross J, Zheng YR. "Statistical channel modeling of wireless shallow water acoustic communications from experiment data". *Proceedings Military Communications Conference*, California, USA, 31 October-3 November 2010.
- [29] Kari D, Marivani I, Khan F, Sayin MO, Kozat SS. "Robust adaptive algorithms for underwater acoustic channel estimation and their performance analysis". *Digital Signal Processing*, 68, 57-68, 2017.
- [30] Pedrosa P, Dinis R, Nunes F. "Joint equalization and phase drift estimation for underwater acoustic communications". *IEEE Global Communications Conference*, Texas, USA, 8-12 December 2014.
- [31] Zhao X, Pompili D, Alves J. "underwater acoustic carrier aggregation: Achievable Rate and Energy-Efficiency Evaluation". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42(4), 1035-1048, 2017.
- [32] Qarabaqi P, Stojanovic M. "Acoustic Channel Simulator". <http://millitsa.coe.neu.edu/?q=projects> (10.11.2018).
- [33] Stefanov A, Stojanovic M. "Design and performance analysis of underwater acoustic networks". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 29(10), 2012-2021, 2011.
- [34] Shi Y, Eberhart R. "A Modified Particle Swarm Optimizer". *Proceedings of the Evolutionary Computation*, Alaska, USA, 4-9 May 1998.
- [35] Kandiyoti R. "Under the sea". *Engineering & Technology*, 4(14), 26-28, 2009.