

## KISMEN ARIZALI OTONOM ROBOTLAR İÇİN EN AZ SAYIDA SONAR SENSÖRÜ KULLANILARAK KAPALI MEKANLARDA KONUM TESPİTİ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Muhammed Çağrı Kaya <sup>(a)</sup>, Serdar Çiftçi <sup>(b)</sup>, Selim Temizer <sup>(c)</sup>

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü ve  
ODTÜ - TSK Modsimmer Merkezi, Mobility Araştırma Laboratuvarı,  
Çankaya, 06800, Ankara, Türkiye

<sup>(a)</sup> mckaya@ceng.metu.edu.tr

<sup>(b)</sup> sciftci@ceng.metu.edu.tr

<sup>(c)</sup> temizer@ceng.metu.edu.tr

### ÖZ

Bu çalışmada, geçirdiği bir kaza, düşman bölgede aldığı bir hasar, vb. nedenlerle bazı donanımlarını hatasız ve etkin bir şekilde kullanamayan otonom robotlar için mümkün olan en az sayıda sonar sensörü kullanılarak konum tespiti yapabilen bir yöntem geliştirilmiş ve gerçek bir robot üzerinde uygulanmıştır. Deneyler için Pioneer P3-DX model bir araştırma robotu kullanılmıştır. Deney robotunun aldığı hasar sonucu robotun iç hareket modelinin hatalı çalıştığı; örneğin düz bir hat üzerinde giderken bile sapmalar yaptığı varsayılmıştır. Ayrıca üzerinde bulunan toplam 16 adet sonar sensöründen sadece karşılıklı olarak yerleştirilmiş 2 tanesinin çalışır durumda olduğu kabul edilmiştir. Robot, görev bölgesi için daha önceden kendisinin oluşturduğu (veya hazır olarak gelebilen) bir referans derinlik haritasına sahiptir. Görev sırasında robot sonar sensörlerinden birini kullanarak sabit bir çizgi üzerinde düz bir şekilde ilerlemeyi sağlarken diğer sonar sensörüyle de uzaklık bilgilerini toplamaktadır. Bu bilgiler önceden belirlenmiş bir sayıya ulaştığında, başka bir deyişle robot bir gözlem için yeterli miktarda bilgi topladığında, yapılan gözlem ve gerçekleştirilen hareket, kullanılan Bayes Filter tekniği ile işlenmekte ve çıktı olarak robot, referans harita üzerinde bulunduğu yer tahminini güncellemektedir. Bu tahminler robotun hareketi süresince güncellenmekte ve robot gerçek konumunu yüksek bir hassasiyetle tespit edebilmektedir. Yöntemin uygulanabilirliği yapılan deneylerle gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bayes filtresi, harita oluşturma, hasara karşı dayanıklılık, insansız kara aracı, konum tespiti, otonom robot

## **INDOOR LOCALIZATION FOR PARTIALLY-DYSFUNCTIONAL AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS USING MINIMUM NUMBER OF SONAR SENSORS**

### **ABSTRACT**

In this study, an indoor localization method that makes use of minimum number of sonar sensors has been developed and applied on a real robot, where a considerable part of the robot's sensory hardware is assumed to have previously been damaged in a crash or during a mission in the enemy zone, etc. and therefore can only provide limited functionality. A Pioneer P3-DX model research robot is used for the experiments. The dead reckoning module of the robot is assumed to be functioning incorrectly due to the damage; for instance, the robot is not capable of following a straight line based solely on information coming from its internal encoders. Additionally, just a pair of sonar sensors located oppositely around the robot is assumed to be functional among the total 16 sonar sensors onboard. The robot has access to a reference depth map of its operational environment, which might have actually been generated before by the robot itself, as is the case for our experiments. The robot uses one of the functional sonar sensors to keep moving on a straight line while collecting depth information with the other sonar sensor during its mission. After accumulating a specified number of raw depth data, the robot computes them into an observation, and applies a Bayesian Filter to update its location estimate on the reference map, taking into account the amount of its positional displacement during data collection. The location estimates keep being updated while the robot continues its motion, and it is observed that the robot can detect its actual location with high precision. Hence, the feasibility of the method is demonstrated through simulated and physical experiments.

**Keywords:** Autonomous robot, Bayes filter, localization, mapping, resilience, unmanned ground vehicle

### **1. GİRİŞ**

Robotlar çok geniş endüstriyel kullanım alanlarına sahiptirler. Özellikle araba parçalarının kaynak edilmesi, baskı devrelerin üzerine bileşenlerin yerleştirilmesi gibi sürekli tekrarlanan ve hassasiyet gerektiren işlerde robotlardan önemli ölçüde faydalanılmaktadır. Ancak, genellikle bir mekanik kol şeklinde olan bu robotlar, üretim bandının bir yerine sabitlenmiş olup belirli bir çalışma alanına (workspace) sahiptirler ve hareketsiz (immobile) robotlar olarak sınıflandırılırlar.

Hareketli robotlar, keşif, araştırma-inceleme, taşıma, vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Kullanım alanının çeşitliliğinin yanında hareketlilik başlı başına bir sorun olabilmektedir. Hareketsiz robotlar sürekli aynı konumda bulduklarından konum tespitine ihtiyaç duymazlar. Bununla birlikte, hareketli robotlar görevlerini istenilen şekilde yapabilmek için gerçek dünyadaki konumlarını tespit etmek zorundadırlar. Bu sorunun çözülmesi hareketli robotlar için elzemdir.

Konum tespiti, otonom ve hareketli hava ve deniz araçları için olduğu gibi kara araçları için de çok önemlidir. Kimi otonom kara araçları konum bilgisini Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System, GPS) yardımıyla tespit etmektedir. Ancak kapalı mekan, kötü hava koşulları, kullanılan donanımın zarar görmesi gibi nedenlerle GPS bilgisi erişilmez olursa, araç amacına uygun olarak hareket edemeyecektir. Bu bilgi kesintisi görev başlamadan önce olursa araç tamamen etkisiz kalacak, görev esnasında olursa ise araç görevi tamamlayamayacaktır. Bu problemlerin çözümü için insansız araçlar, görev yaptıkları çevreyi tanıyabilecek ve bu yolla konumlarını tespit edecek sistemlerle donatılabilirler [1].

Bir insansız kara aracının konumunu tespit etmesi problemi genellikle “hareketli robot konum tespiti problemi” (mobile robot localization problem) [2] kapsamında değerlendirilir. Bu problem, robotun çevresine göre konumunu ve yönelimini tespit etmeyi içerir.

Hareketli robot konum tespiti problemi bazı türlere ayrılır. Bunlardan biri *pozisyon izlemedir* (position tracking) [3]. Bu problemde robot başlangıç pozisyonunu bilmekte ve hareketi süresince bu bilgiyi korumaya çalışmaktadır. Bir başkası *küresel konumlandırma problemidir* (global localization problem) [4]. Bu problem için robot başlangıç konumunu bilmemekte ve sonradan yapacağı gözlem ve hareketlerle konumunu tespit etmeye çalışmaktadır. Bir diğer problem olan *kaçırılmış robot probleminde* ise (kidnapped robot problem) [5] kendisini çok iyi konumlandırmış bir robot, yapılan değişiklik robota bildirilmeksizin, alınarak çevredeki başka bir yere yerleştirilir. Bundan sonra robotun konumunu tekrar doğru bir şekilde tespit etmesi beklenir.

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen problemlerin otonom bir kara aracında çözümü için *Bayes Filtresi* [6, 7] kullanan bir teknik önerilmektedir. Sensör verileri Pioneer P3-DX robotu yardımıyla toplanmaktadır. Bulunduğu çevreyi dolaşan robot sonradan kullanılmak üzere sonar sensörleri yardımıyla bölgenin derinlik verilerini içeren bir referans harita hazırlamaktadır. Robot, kendisini konumlandırması istenildiğinde, bir yandan hareket ederek çevresinden derinlik bilgisi toplamakta, diğer yandan bu bilgileri referans haritasıyla karşılaştırarak hangi bölgelerde ne kadar uyuma olduğunu tespit etmeye çalışmaktadır. Robot nerede olduğuna dair *tahmin durumunu* (belief state) hareketi boyunca güncellemektedir. Tahmin durumu, söz konusu problem için durum uzayı üzerindeki olasılık dağılımıdır.

## 2. ÖNERİLEN YÖNTEM

Sonar sensörler bir çevrenin derinlik bilgisini tespit etme yeteneğine sahiptir. Böylece söz konusu çevrenin tamamının bir derinlik haritası çıkarılabilir. Bu harita kendisini konumlandırması istenen robot tarafından görev öncesi çıkarılabileceği gibi, başka bir araç tarafından da oluşturulabilir. Eğer bir otonom kara aracına görevi boyunca ulaşılabilir olacak şekilde bu derinlik haritası sağlanırsa, ve araç hareketi devam ederken çevreden derinlik bilgisi toplayabiliyorsa, referans harita üzerinde konumunu tespit edebilir. Bu çalışmada kesin konumu tespit etmek için bir Bayes modeli kullanılmıştır. İlk olarak, robotun bulunma ihtimali olan her durum (state) için eşit bir olasılık dağılımı (uniform distribution) yapılmıştır. Robot bulunduğu konumda bir *gözlem* yapar ve kullandığı bir *sensör modeli* (1) ile tahmin durumlarını günceller.

$$P(X_i | Z) = P(Z | X_i) P(X_i) / P(Z) \quad (1)$$

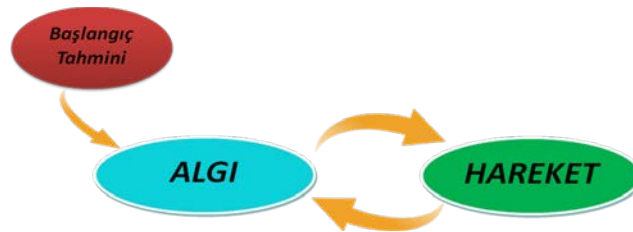
Burada ( $i=1, \dots, n$ )  $n$  adet durum için,  $X$  durumları ve  $Z$  gözlemleri ifade etmektedir.

Robotun belli bir miktar hareketi sonrası bir *geçiş modeli* (2) uygulanarak tahmin durumları tekrar güncellenir.

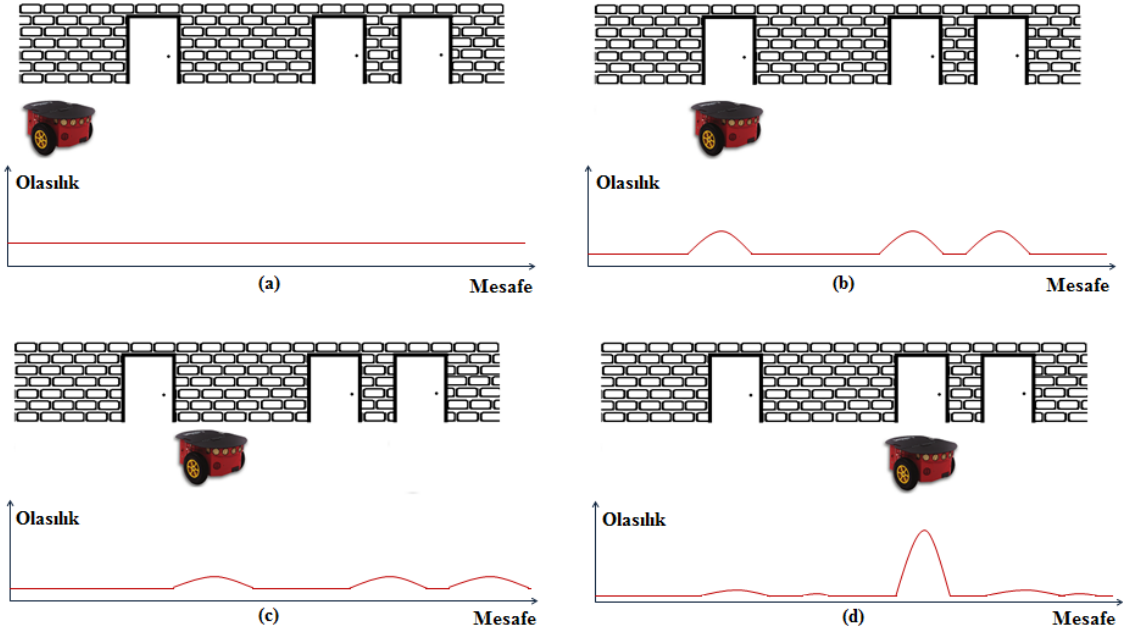
$$P(X_i(t)) = \sum_j P(X_j(t-1)) P(X_i | X_j) \quad (2)$$

Geçiş modeli,  $t$  anında  $X_i$  durumunda olmanın,  $t-1$  anında  $j$  ile indekslenmiş durumlarda olma ihtimaline bağlı olduğunu göstermektedir.

Robotun her yeni konumunda tekrar bir gözlem yapılır ve güncellemeler tekrarlanır. Birkaç adım sonra en yüksek olasılığa sahip olan durum robotun gerçek konumunu temsil etmeye başlar. Sonuç olarak robot nerede olduğunu hızlı ve doğru bir biçimde tespit edebilmektedir. Bu döngü **Şekil 1**'de gösterilmektedir. Başlangıç tahmini olarak her bir durum için eşit olmak üzere olasılıklar atanır. Robot sürekli çevresini algılama ve hareket etme durumları arasında geçiş yapar. Her algı ve hareket basamağıyla birlikte tahmin durumu güncellenir. **Şekil 2**'de, algı-hareket döngüsünü kullanan robotun ilerleyen adımlarda tahmin durumunu iyileştirdiği sembolik olarak gösterilmiştir [7].



**Şekil 1.** Algı-hareket döngüsü



Şekil 2. Robotun gözlemler sonucu tahmin durumunu iyileştirmesi

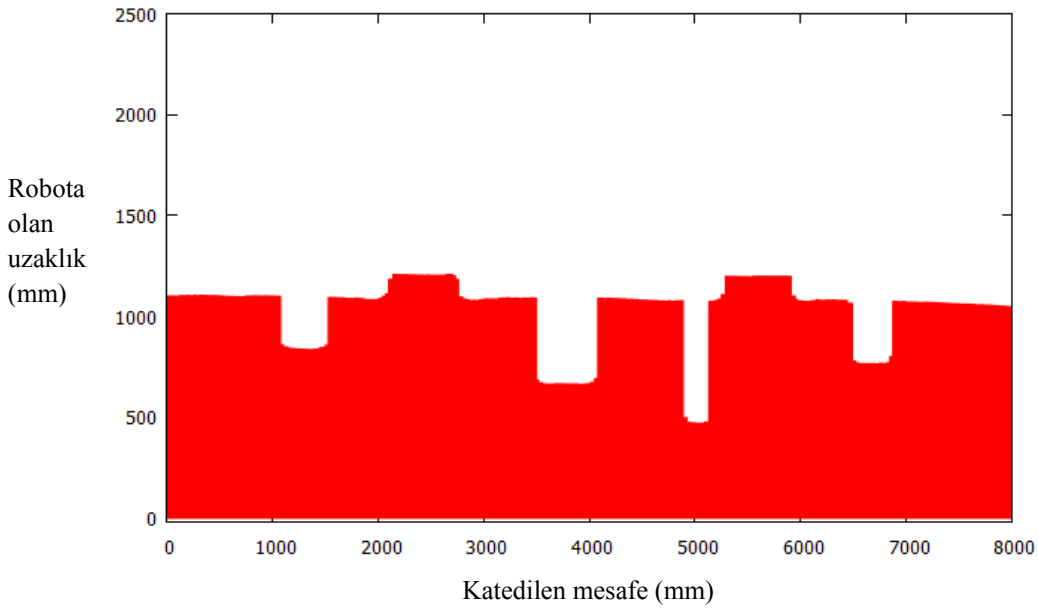
### 3. YÖNTEMİN PIONEER P3-DX ROBOTUNA UYGULANMASI

Yapılan deneyler için ortam olarak Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü içindeki çeşitli koridorlar seçilmiştir. Robot, bir tarafı düz bir duvardan oluşan, diğer tarafında ise kapı girintileri ve derinliği çeşitlendirmek amacıyla yerleştirilmiş bazı nesnelerin bulunduğu bir koridorda (sanal) düz bir çizgi üzerinde koridora paralel olarak hareket ederek derinlik bilgisi toplamaktadır. Robotun çevresine düzenli aralıklarla yerleştirilmiş 16 adet sonar sensörü bulunmaktadır. Bu sayede farklı açılardan bilgi toplayabilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde bu sensörlerden sadece iki tanesi kullanılmıştır. Bunlardan ilki robotun sol tarafında bulunan 1 numaralı sonar, ikincisi ise sağ tarafında bulunan 8 numaralı sonardır. Bu iki sensör, robot düz bir hat üzerinde ilerlediğinde robotun hareket yönüne dik açılarda sağ ve sol taraflardan veri toplayabilmektedir. Bu sayede robot bir tarafındaki düz bir duvara paralel hareket ederken diğer taraftaki nesnelerin ve boşlukların uzaklık bilgilerini toplayabilir. Yapılan deneylerde, 8 numaralı (sağdaki) sonar, referans haritayı oluşturmak üzere koridorun sağ tarafının derinlik bilgilerini toplamak için kullanılırken, 1 numaralı (soldaki) sonar ise karşısındaki düz duvarla robotun arasındaki mesafeyi sürekli kontrol ederek, bu mesafenin sabit kalması için robotun hareketini düzenler ve bu sayede robotun dümdüz bir hat üzerinde ilerlemesini sağlar.

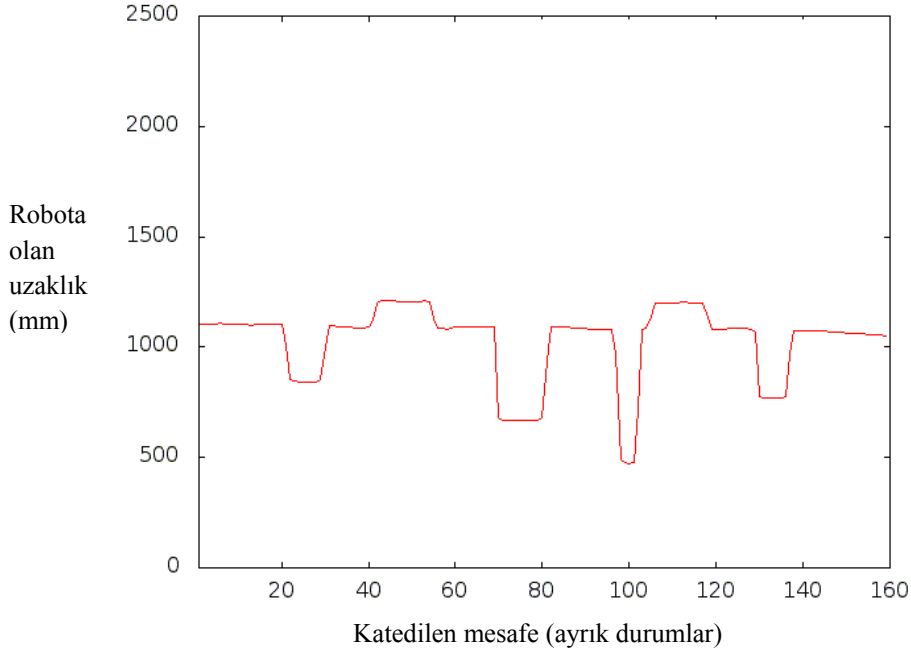
Aşağıda ilgili grafiklerin sunulduğu örnek bir deneyde robot, koridor üzerinde 8 metre boyunca hareket ederek bir referans harita çıkarmıştır. Bu 8 metrelik hareket sonucunda

robot, katedilmiş olan her 1 milimetrelik yol için bu sırada ölçülmüş olan bir adet derinlik bilgisi olmak üzere toplam 8000 adet ondalıklı sayıyı bir dosyaya kaydeder. Robotun hareketiyle sonarlardan gelen bilgilerin senkronizasyonunun sağlanmadığında bu veri içinde çok miktarda gürültü de bulunmaktadır. Ayrıca robot, sonar sensörünün bilgi toplama hızına göre daha hızlı hareket ettiği için, her bir milimetrelik yol boyunca bir sonar verisi elde edilememekte ve böylelikle bir ölçüm yapılamadan atlanmış olan her milimetrelik yol için yapılan derinlik ölçüm değerleri “sıfır” olarak görünmektedir. Bu veriyi kullanılabilir hale getirmek için koridorun ve dolayısıyla da oluşturulacak olan referans haritanın aslında 5'er santimetre uzunluğunda olan ayırık hücrelerden oluştuğu varsayılmıştır. Burada kullanılan 5 cm uzunluğu kritik bir değer olmayıp, içinde en az bir adet “sıfır” olmayan kullanılabilir bir sonar okuma değeri barındıran ve yeterli çözünürlükte bir konum tespiti yapmayı sağlayabilecek herhangi başka bir değer de seçilebilir. Netice olarak 8 metre uzunluğundaki koridorun 160 ayırık hücreden oluştuğu kabul edilmiştir. Bu ayırık mantıktan faydalanılarak, kaydedilmiş olan dosyadaki her 50 milimetreye karşılık gelen geçerli derinlik değerleri sayılarak ortalamaları alınmış, ve geçersiz değerler yerine de bu ortalama değerler atanmıştır. Referans haritanın ham hali **Şekil 3**'te, işlenmiş hali ise **Şekil 4**'te gösterilmektedir.

Daha sonra robot, konumlandırma başarısını test etmek için referans haritası oluşturulan 8 metre uzunluğundaki koridorun rastgele bir yerinden başlamak üzere 3 metre hareket ettirilmiştir. Bu hareketi süresince de robot 8 numaralı sonar sensörünü kullanarak derinlik bilgisi okurken 1 numaralı sensörünü de düz bir şekilde hareket etmek için kullanmıştır.

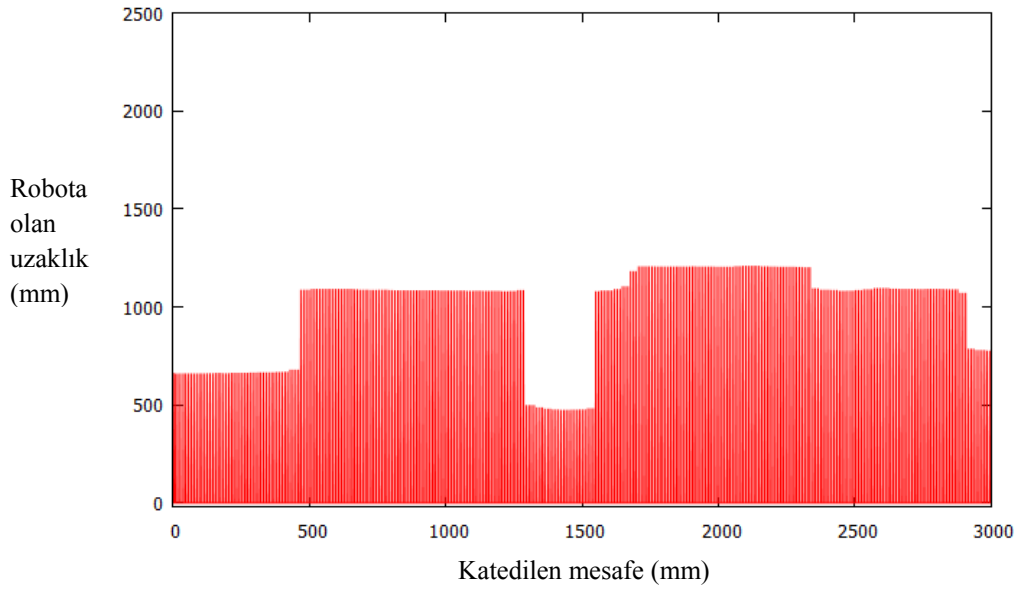


**Şekil 3.** Ham veri içeren referans harita

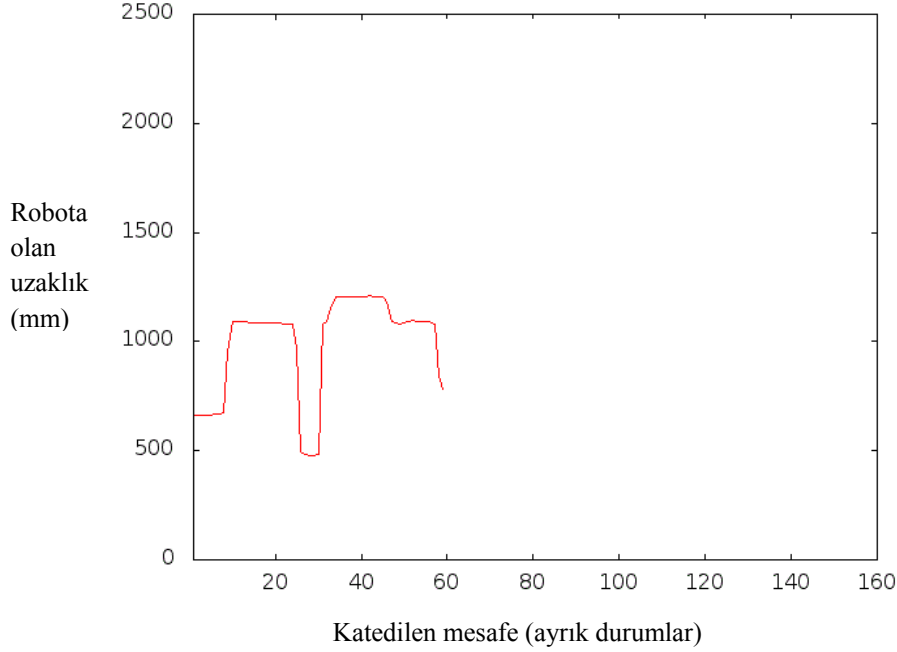


Şekil 4. İşlenmiş referans harita

Tıpkı referans haritada olduğu gibi bu 3 metrelik hareket için de her 1 milimetre için bir derinlik bilgisi toplanmış ve ham veri sürekli işlenerek kullanılabilir hale getirilmiştir. Şekil 5'te ham test verisi yer alırken Şekil 6'da işlenmiş bilgi yer almaktadır.



Şekil 5. Test verisinin ham hali



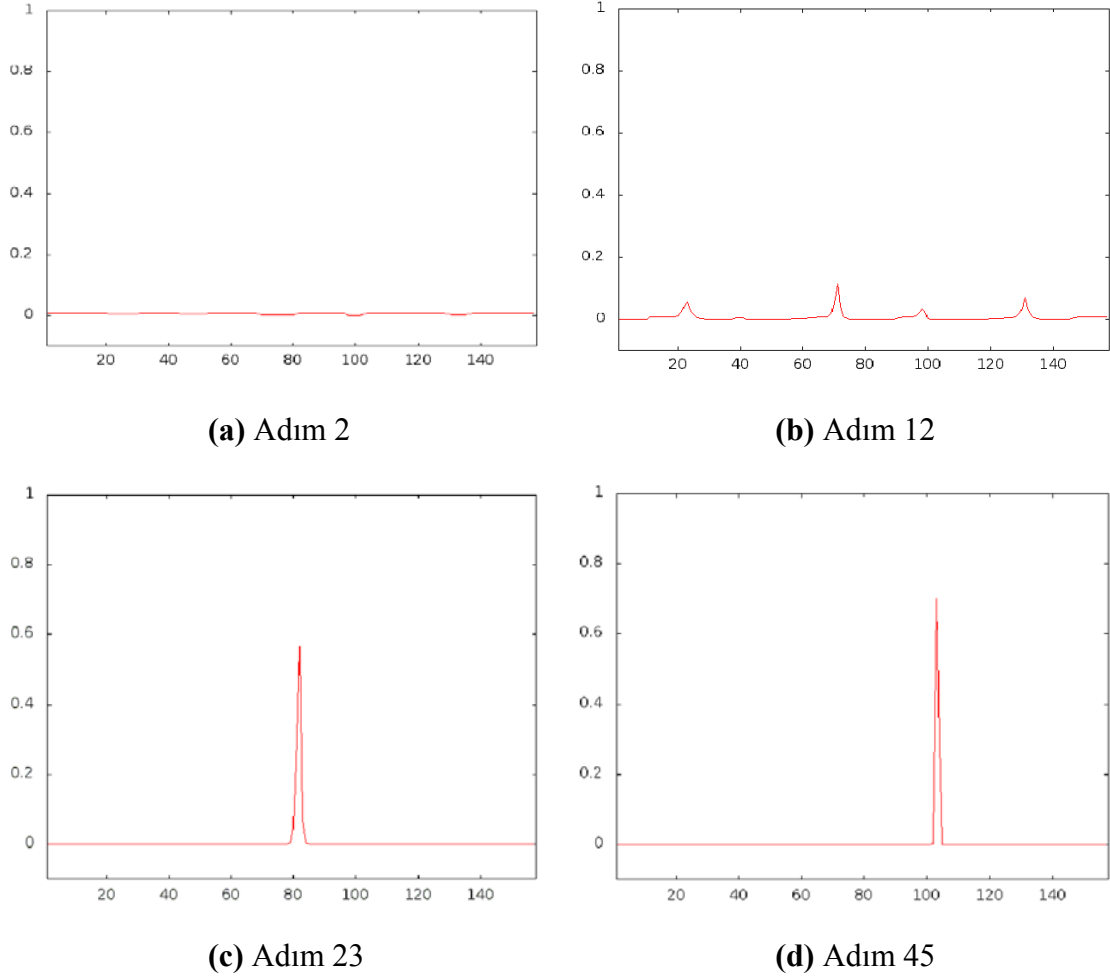
**Şekil 6.** Test verisinin işlenmiş hali

**Şekil 7**'de robotun kendisini konumlandırması (konum tahminini sürekli olarak güncellemesi) esnasında, seçilmiş bazı anlara ait olmak üzere, 160 duruma bölünmüş referans harita üzerindeki olasılık dağılımları yer almaktadır. **Şekil 7**'deki grafiklerde yatay eksenler ayrık durumları, düşey eksenler ise olasılık değerlerini göstermektedir. **Şekil 7 (a)**'da 2. adımdaki olasılık dağılımı görülmektedir. Burada her bir adım, katedilen her 5 santimetrelilik mesafe boyunca ölçülen ham derinlik bilgilerinin işlenerek bir gözlem haline getirilmesi, ve bu gözlem baz alınarak konum tahmininin güncellenmesi işlemine karşılık gelmektedir. **Şekil 7 (b)**, bu örnek deney sırasında robotun gerçek konumunu temsil eden olasılığın diğer olasılıkları geçtiği ilk adım olan 12. adımı göstermektedir. Bu süre, farklı deneyler için farklılık gösterip, robotun yerini net biçimde tespit edebilmesi için yeterli miktarda (ayırddedici nitelikte) gözlem yapabildiği ile ilgilidir. **Şekil 7 (c)** 23. adımdaki durumu gösterirken **Şekil 7 (d)**'de 45. adımdan sonra konum tahmininin bu deneyde en yüksek değere ulaştığı görülmektedir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada Bayes filtreleme tekniği üzerine inşa edilmiş ve minimum sayıda sonar sensörünün kullanımını içeren bir konum tespit metodu geliştirilmiş ve Pioneer P3-DX model bir araştırma robotu üzerinde uygulanmıştır. Robotun kendi iç konum takip aksamının doğru olarak çalışmadığı ve robotun düz bir hat üzerinde bile ilerlemesini sağlayamadığı varsayılmış, bu sorunu gidermek için bir adet sonar sensörü kullanılarak





**Şekil 7.** Çeşitli adımlardaki ayırık durum olasılıklarının dağılımları

robotun belirlenen bir rotada (bu çalışma için düz bir hat üzerinde) tutulması sağlanmıştır. Robot, diğer sonar sensörü vasıtasıyla ise mesafe ölçümleri yaparak kendini bir referans harita üzerinde hızlı, doğru ve yüksek güvenilirlikle konumlamayı başarmaktadır.

İstenilen hızlarda sağlanamayan ve bu sebeple atlamalı olarak toplanabilen sensör verilerinin kullanışlı bir hale getirilebilmesi için operasyonel ortamın durumlara ayrıştırılması prensibi kullanılmıştır.

Bu çalışmada çeşitli sensörlerin hasarlılık durumlarının ve hasar miktarlarının baştan bilindiği varsayılmıştır. Çalışmanın asıl yönü, böyle durumlar için çözüm bulmak üzerinedir. Çözüm bilindikten sonra, hasarsız olarak görevine başlayan bir otonom aracın, hasar aldıktan sonra adaptif olarak geliştirilen yöntemleri kullanmasının nispeten kolay olduğu düşünülmektedir ve ileride bu yönde çalışmalar yapılması da

planlanmaktadır. Bu çalışmanın devamında ayrıca yöntemin sürekli (continuous) ortamlara adapte edilmesi ve sürekli ortamlarda başarılı olan Monte Carlo konumlandırma teknikleri [2] kullanılması hedeflenmektedir.

## 5. KAYNAKÇA

- [1] Karan, O., Eraslan, H. A. ve Kurnaz, S. (2010), Topografik Bilgiler ve Uydu Görüntü Verilerini Kullanarak 3 Boyutlu Alan Tanıma Sistemi, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi* Cilt No.4, Sayı 4, 31-40
- [2] Thrun, S., Fox, D., Burgard, W. ve Dellaert, F. (2001), Robust Monte Carlo Localization for Mobile Robots, *Artificial Intelligence*, No.128, 99-141
- [3] Schiele, B. ve Crowley, J. (1994), A Comparison of Position Estimation Techniques Using Occupancy Grids, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA-94)*, 1628-1634
- [4] Burgard, W., Derr, A., Fox, D. ve Cremers, A.B. (1998), Integrating Global Position Estimation and Position Tracking for Mobile Robots: The Dynamic Markov Localization Approach, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'98)*, 730-735
- [5] Engelson, S. ve McDermott, D. (1992), Error Correction in Mobile Robot Map Learning, *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France*, 2555-2560
- [6] Cassandra, A. R., Kaelbling, L.P. ve Kurien, J. A. (1996), Acting Under Uncertainty: Discrete Bayesian Models for Mobile-Robot Navigation, *Intelligent Robots and Systems IEEE*, 963-972
- [7] Thrun, S., Burgard, W. ve Fox, D. (2005), Probabilistic Robotics, MIT Press, ABD