

## MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ LOKALİZASYONU

**Muzaffer KANAAN (ORCID ID: 0000-0003-4510-8392)<sup>1\*</sup>**  
**Zeynel Abidin KUŞ (ORCID ID: 0000-0003-3164-7440)<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup>Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Ziraat Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

*Geliş / Received: 30.03.2017*  
*Kabul / Accepted: 06.11.2017*

### ÖZ

Bu çalışma bina içi koşullarda çalışmak durumunda olan mobil robotların ulaşma zamanı tekniği kullanılarak kablosuz lokalizasyonu hakkındadır. Binanın içinde belli noktalarda konumlandırılmış referans noktaları vasıtası ile robotun bu noktalara olan mesafesinin ulaşma zamanı metodu ile tespiti ve buna bağlı olarak robotun konumunun tespiti (lokalizasyonu) hedeflenmektedir. Çalışmanın literatüre somut katkıları şu şekilde özetlenebilir. İlk olarak mobil robotun referans noktalarına göre hareketi sonucu değişen kanal koşullarına bağlı olarak değişken mesafe ölçüm hatalarının olduğu durumlarda iki farklı lokalizasyon algoritmasının (en küçük kareler ve ağırlıklı en küçük kareler) performansları karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir. İkinci olarak mesafe ölçümlerindeki hataları mesafe ölçümleri lokalizasyon algoritmaları tarafından kullanılmadan önce azaltmayı hedefleyen bir hata kestirim metodu önerilmiş, bahsedilen lokalizasyon algoritmalarının performansı bu metot ile beraber analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar hata kestirim metodu ile beraber kullanıldığında her iki algoritmanın performansının sistem senaryolarına bağlı olarak %5-17 oranında iyileştirilebileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Mobil robot, ulaşma zamanı, kablosuz lokalizasyon

## WIRELESS INDOOR LOCALIZATION OF MOBILE ROBOTS USING TIME OF ARRIVAL

### ABSTRACT

This work focuses on wireless localization of a mobile robot operating inside a building using the time of arrival technique. The basic idea is to perform measurements of range (or distance) between the robot and reference points located at specific points inside the building by means of time of arrival measurements and using these measurements to estimate the location of the robot. The contributions of this work can be summarized as follows. First, the performance of two localization algorithms (namely least-squares and weighted least-squares) are compared in the presence of ranging errors that fluctuate as a result of mobile robot movement with respect to the reference points. Second, an error estimation method is proposed, the goal of which is to reduce the error in the range measurements prior to their use with localization algorithms. The performance of the aforementioned localization algorithms, working in conjunction with this error estimation method, are analysed. The results clearly indicate that the performance of both algorithms can be improved by approximately 5-17% depending on system scenarios.

**Keywords:** Mobile robot, time of arrival, wireless localization

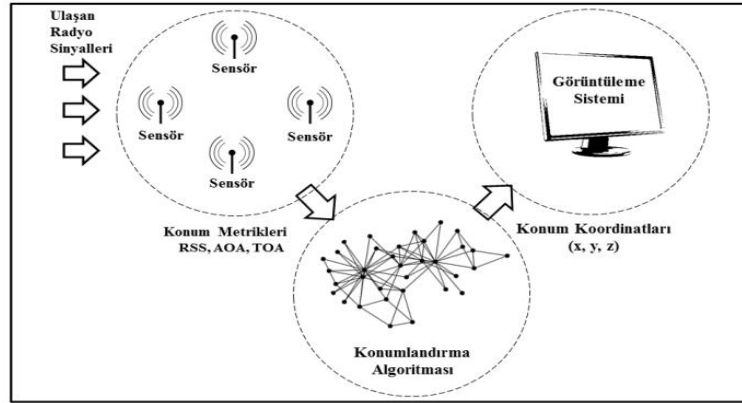
\*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 352 207 66 66; e-mail / e-posta: mkanaan@erciyes.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Günümüzde mobil robotların çok ciddi kullanım sahası edinmeye başladıkları bir gerçektir. Mobil robotlar, güvenlik türü askeri uygulamalardan, temizlik, rehabilitasyon, yaşlı, engelli ve hastalara destek, insansız arabalar gibi ticari uygulamalara kadar çok geniş bir yelpazede kullanılabilirler [1-13]. Bu uygulamaların önemli bir bölümü de robotların binaların içinde çalışabilmelerini gerektirmektedir. Robotik teknolojideki genel eğilim robotların gitgide daha akıllı ve kendi başına hareket edebilen otonom yapılar haline gelmeleri şeklindedir. Mobil robotların burada zikredilen tüm uygulamalar için mutlaka gereken temel özelliği buldukları ortamın farkında olmaları (context awareness) ve buna göre zeki bir tepki verebilmeleridir. Buna yönelik olarak bir mobil robotta olması gereken en temel özellik, bulunduğu konum hakkında bilgisi olmasıdır. İşte tam da bundan dolayıdır ki mobil robotların bina içi koşullarda konumlandırılması (veya **lokalisasyonu**) problemi özel önem taşımakta ve bu makalenin de ana odak noktasını oluşturmaktadır.

Mobil robotların konumlandırılması için teknik açıdan farklı alternatifler mevcuttur. Bunlar görüntü işleme teknikleri [14], optik akış algılayıcıları ve buna dayalı teknikler [15-17] ve ultrasonik sensörler ve buna dayalı konumlandırma teknikleri [18] olarak farklı başlıklar altında incelenebilir. Fakat son zamanlarda bilhassa kablosuz haberleşmenin yaygınlaşmasına bağlı olarak, radyofrekans (RF) sinyallerin kullanımına dayalı kablosuz konumlandırma teknikleri ciddi derecede önem kazanmaya başlamıştır. Bu tür kablosuz lokalisasyon teknikleri makalenin de odak noktasını oluşturmaktadır.

Genel olarak kablosuz konumlandırma teknikleri, konumları global bir koordinat sistemine göre yaklaşık olarak bilinen ve **referans noktası** adı verilen radyo alıcı-vericilerinden alınan sinyallerin belli özelliklerinin (bunlara literatürde **konum metriği** denilmektedir) ölçülmesi ve bu bilginin bir algoritma tarafından işlenerek konumun tespit edilmesi prensibine dayanır. Sistemin genel yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir. Pratikte yaygın olarak kullanılan konum metrikleri üç türdür: **alınan sinyalin gücü** (received signal strength; RSS), **ulaşma zamanı** (time of arrival; TOA) ve **ulaşma açısı** (angle of arrival; AOA). RSS parametresi hemen her türlü kablosuz haberleşme modülünün ölçebildiği bir parametre olmakla birlikte lokalisasyon açısından bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bunların en önemlisi, bina içi radyo propagasyon koşullarında herhangi bir noktada algılanan sinyal gücü seviyesi ile o noktanın fiziksel konumu arasında birebir bir ilişki olmamasıdır. Bu durum, RSS temelli konumlandırma algoritmalarının diğer tekniklere nazaran biraz daha karmaşık olmalarına neden olmaktadır. Ulaşma açısı ise bina içi koşullardan dolayı hassas olarak ölçülmesi zor bir parametredir ve bunun için bina içi kablosuz konumlandırma sistemlerinde pek tercih edilmemektedir. Bu nedenlerden dolayı, bina içi kablosuz konumlandırma sistemlerinde ulaşma zamanı tercih edilmiştir. Netice olarak, mobil robotların bina içi koşullarda ulaşma zamanı kullanılmak suretiyle konumlandırılması problemi bu makalenin odak noktasını oluşturmaktadır.



Şekil 1. Bir Bina içi kablosuz konumlandırma sistemlerinin yapısı

Pratik koşullarda, mobil robotların hareketinden dolayı robot ile belli bir referans noktası arasındaki kablosuz kanal karakteristikleri değişime uğramaktadır ve bu durum ulaşma zamanı parametresinin ölçümünde hatalara, dolayısıyla daha düşük lokalisasyon performansına yol açabilmektedir. Ulaşma zamanına dayalı mobil robot lokalisasyon sistemlerinin performansının gerçekçi olarak yapılabilmesi için kanal yapısındaki bu dinamik değişimin dikkate alınması gerekmektedir. Bu makalenin literatüre ilk katkısı kanalın dinamik yapısının lokalisasyon algoritmalarının performansına olan etkilerini irdelemektir. Bu makale kapsamında en küçük kareler (least squares; LS) ve ağırlıklı en küçük kareler (weighted least squares; WLS) tekniklerinin dinamik olarak değişen kanal koşullarındaki performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

**MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ LOKALİZASYONU**

Kanalın yukarıda da kısaca zikredilen bu dinamik yapısı göz önüne alındığında, daha dayanıklı lokalizasyon algoritmaları elde edebilmek için bazı adımların atılması gerektiği aşikârdır. Bunu elde etmenin bir yolu, ulaşma zamanı ölçümlerindeki hatanın değerinin kestirilmesi, bu şekilde parametre değerlerinin gerçeğe daha yakın değerlere çekilmesi, asıl lokalizasyon hesaplarının bu düzeltilmiş ulaşma zamanı değerleri temel alınarak yapılmasıdır. Bu makalenin literatüre ikinci somut katkısı olarak böyle bir hata kestirim tekniği önerilmiş ve hem LS, hem de WLS algoritmalarından elde edilen lokalizasyon performansını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Makalenin ilerleyen bölümlerinde bu konu da ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Bu makalenin geri kalan kısmı beş bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde bina içi kablosuz kanal koşulları ve bunun lokalizasyon performansına olan etkileri ele alınacaktır. Makale kapsamında incelenen LS ve WLS algoritmalarının yapıları üçüncü bölümde kısaca irdelenecektir. Söz konusu algoritmaların performans analizine yönelik kullanılan metodoloji dördüncü bölümün konusudur. Beşinci bölümde elde edilen bulgular sunulacak ve yorumlanacaktır. Altıncı ve son bölüm ise çalışmadan elde edilen sonuçları özetlemektedir.

## 2. BİNA İÇİ KABLOSUZ KANAL KOŞULLARI VE LOKALİZASYON PERFORMANSINA ETKİLERİ

Bu bölümde ulaşma zamanı temelli lokalizasyon sistemleri özelinde bina içi kablosuz kanal koşulları ve bunun lokalizasyon performansına olan etkileri ele alınacaktır. Konuyu daha net ortaya koyabilmek açısından öncelikle ulaşma zamanı temelli lokalizasyonun nasıl yapıldığı anlaşılmalıdır. Ulaşma zamanı temelli lokalizasyon, öncelikle konumu tespit edilmek istenen bir sensör veya robotun üç veya daha fazla kablosuz alıcı-vericiden (transceiver) mesafesinin bulunması esasına dayanır. Bu mesafe verileri işlenerek sensör veya robotun konumu hesaplanabilir. Bir kablosuz alıcı ve verici arasındaki mesafe ( $d$ ) aşağıdaki denklemde ifade edildiği gibi hesaplanabilir:

$$d = c \times \tau \quad (1)$$

Denklem (1)'de,  $c$  boş uzaydaki sabit ışık hızını ( $3 \times 10^8$  m/s),  $\tau$  ise vericiden gönderilen sinyalin alıcıya varıncaya kadar maruz kaldığı gecikme miktarını ifade eder. İşte bu gecikme miktarının doğru bir şekilde kestirilmesi alıcı ve verici arasında ölçülen mesafenin, dolayısıyla lokalizasyon hassasiyetini etkileyecektir. Kablosuz kanal koşullarının etkileri tam da bu noktada hissedilmektedir.

Kablosuz kanal koşullarının ulaşma zamanı temelli mobil robot lokalizasyon performansına etkileri iki temel senaryo altında değerlendirilebilir: statik durum (yani robotun referans noktalarına göre sabit halde olduğu durum) ve dinamik durum (robotun hareket halinde olduğu durum). Bu makalede sunulan performans analizleri dinamik durumu esas alarak yapılmıştır. Bununla beraber, dinamik durumdaki kanal koşullarının daha kolay anlaşılabilmesi açısından öncelikle statik durum irdelenecektir.

### 2.1. Statik Durum

Ulaşma zamanı temelli lokalizasyon sistemlerini etkileyen iki temel kanal unsuru vardır. Bunların bir tanesi çoklu yol (multipath), diğeri ise gölgeleme (shadowing) etkileridir. Çoklu yol kavramı, vericiden çıkan sinyalin yansıma (reflection), kırılma (refraction), kırınım (diffraction) ve saçılma (scattering) etkilerinden dolayı birden fazla farklı yol üzerinden alıcıya ulaşması demektir [19]. Bütün bu farklı yollardan gelen sinyallerin hepsi farklı miktarlarda gecikmeye, genlik ve faz değişimine maruz kalırlar. Netice itibarı ile alıcının algıladığı toplam sinyal, vericiden gönderilen orijinal sinyal ile eğer alıcı vericiyi direkt görüyorsa bunun belli miktarlarda geciktirilmiş, genlik ve faz değişimine uğramış versiyonlarının toplamı olacaktır. Alıcı ile verici arasında sinyalin takip ettiği  $N$  adet yol olduğu düşünülüğünde, çoklu yol özellikleri taşıyan bir kablosuz kanalın dürtü yanıtı

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \delta(\tau - \tau_i) \quad (2)$$

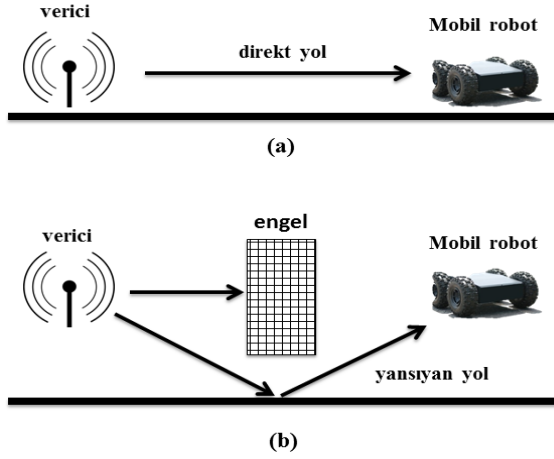
olarak ifade edilebilir. Bu denklemde  $\alpha_i$   $i$ -inci yoldan gelen sinyalin maruz kaldığı zayıflama miktarını,  $\tau_i$  ise yine aynı sinyalin alıcıya varıncaya kadar maruz kaldığı gecikme miktarını ifade etmektedir.

Bina içi kablosuz lokalizasyonu zorlaştıran bir diğer etken ise referans noktaları ile konumu tespit edilmek istenen robot arasında tıkanmamış temiz bir direkt görüş hattı (line of sight; LOS) olmaması durumudur (Şekil

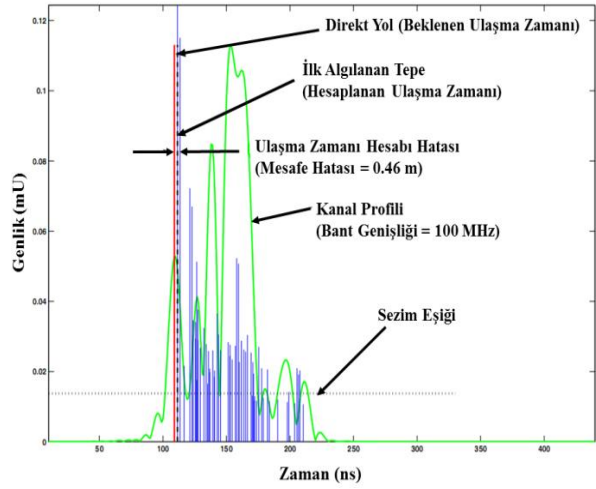
M. KANAAN, Z.A. KUŞ

2b). **Gölgeleme etkisi** olarak adlandırılan bu durum ulaşma zamanı temelli lokalizasyon açısından bir problemdir. Bunun neden bir problem olduğunu daha net anlamak için öncelikle geometrik olarak iki nokta arasındaki en kısa yolun o noktaları birbirine bağlayan düz çizgi olduğunun hatırlanması gerekir. Bu noktadan hareketle, belli bir referans noktası ile robotun arasındaki mesafe ulaşma zamanı kullanılarak hesaplanacak ise, ikisi arasındaki direkt görüş hattından, veya kısaca **direkt yoldan** (direct path; DP), gelen sinyale ait gecikme değerinin dikkate alınması gerekir. Bu da bina içi kablosuz kanal koşullarından dolayı her zaman mümkün olamamaktadır.

Bazı bina içi koşullarda direkt yoldan gelen sinyal alıcı tarafına, her ne kadar direkt görüş hattı olmasa da, alıcının sezim eşliğinin (receiver sensitivity) üstünde bir güç seviyesinde ulaşabilmekte, dolayısıyla mesafe ölçümünde dikkate alınabilmektedir. Bu durum **Direkt yolun algılanması** (detected direct path; DDP) olarak adlandırılır. Bu mevzuu daha net olarak anlamak için Şekil 3'te gösterilen ve literatürde **kanal profili** (channel profile) olarak bilinen grafiğin incelenmesi yeterlidir. Kanal profilleri, farklı yollardan gelen sinyallerin gücünü, her yolun maruz kaldığı gecikmenin bir fonksiyonu olarak ifade eden grafiklerdir. Genel bir prensip olarak kanal profilinde alıcının sezim eşliğinin üzerinde olan ilk tepe değere ait gecikme miktarı ulaşma zamanı değeri olarak değerlendirilir ve bu değer **algılanan ilk tepe değeri** (first detected peak; FDP) ismini alır. Alıcı tarafında kanal profiline uygun bir tepe algılama (peak detection) algoritması uygulanarak bu değer kolaylıkla tespit edilebilir.



Şekil 2. Kablosuz konumlandırmada (a) Line of Sight (LOS) ve (b) Non Line of Sight (NLOS) durumları



Şekil 3. DDP durumunda kanal profili [20]

Normal şartlar altında algılanan ilk tepe değeri direkt yoldan gelen sinyale aittir (yani FDP sinyali = DP sinyali). Buna istinaden alıcı ve verici arasındaki direkt mesafe aşağıdaki denklemde ifade edildiği şekilde hesaplanabilir.

$$d_{DP} = \tau_{DP} \times c \quad (3)$$

Yukarıdaki denklemde  $\tau_{DP}$  değeri direkt yolu izleyen sinyalin maruz kaldığı gecikme değerini (s) ifade etmektedir. Çoklu yol etkilerinden dolayı direkt yoldan farklı bir yolu izleyerek alıcıya ulaşan sinyal FDP sinyali olarak algılanabilir; böyle bir durumda FDP sinyali ile DP sinyali aynı olmayacaktır. Bu durumda  $d_{FDP}$  mesafesi (m) aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır:

$$d_{FDP} = \tau_{FDP} \times c \quad (4)$$

Denklemde  $\tau_{FDP}$  ilk algılanan tepe değerine ait gecikmeyi ifade etmektedir. Direkt yoldan gelen sinyal çoklu yol etkisinden dolayı zaman skalasında sola veya sağa kayma gösterebilir. Bu durum ölçülen mesafenin gerçek mesafeye göre eksik ya da fazla olmasına neden olacaktır. Gerçek mesafe ile ölçülen mesafe arasındaki bu farka **mesafe ölçüm hatası** (distance measurement error; DME) denilmektedir. Bu değer aşağıdaki denklemde  $e_d$  ile ifade edilmektedir.

$$e_d = d_{FDP} - d_{DP} \quad (5)$$

*MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ LOKALİZASYONU*

Yukarıdan da anlaşılacağı gibi, DDP durumunda mesafe ölçüm hatasının temel kaynağı çoklu yol etkileridir. Mesafe ölçümü için kullanılan sistemin bant genişliğinin artırılması ile çoklu yol bileşenlerinin daha yüksek çözünürlük ile tespit edilebildiği, bu şekilde de direkt yola dair ulaşma zamanının daha hassas olarak kestirilerek mesafe ölçüm hatasının azaltılabildiği saptanmıştır [21].

Bazı durumlarda da direkt yolun bilhassa büyük boyutlarda metalik cisimler tarafından (örnek: asansör kabinleri, fabrika ortamlarında büyük makineler) tıkanması sonucu direkt yoldan gelen sinyal alıcı tarafından hiçbir şekilde algılanamamaktadır. Direkt yolun algılanamaması (undetected direct path; UDP) olarak adlandırılan bu durumda alıcı direkt yol yerine diğer yollardan gelen sinyallerden birini direkt yoldan gelen sinyal olarak algılar. Fakat Şekil 2’den de açıkça görüleceği gibi direkt yol dışındaki yollardan gelen sinyaller geometrik olarak direkt yola nazaran daha uzak bir mesafe kat ederek alıcıya ulaştıklarından daha fazla bir gecikmeye maruz kalırlar. Bu daha yüksek gecikme değeri denklem (1) kapsamında mesafe hesabı için kullanılırsa elde edilecek mesafe değeri gerçek değere göre çok daha yüksek bir değer olacaktır. İşte bu durumdan dolayı UDP durumlarında elde edilen mesafe ölçüm hataları DDP durumlarında elde edilen hata değerlerinden çok daha yüksek olabilmektedir [20]. DDP durumunun aksine, mesafe ölçümü için kullanılan sistemin bant genişliğinin artırılması UDP durumlarında mesafe ölçüm hatasının azaltılmasını sağlamamaktadır [22].

Mesafe ölçüm hatasının kullanılan sistemin bant genişliğine bağlı olduğu fikri daha evvel ifade edilmişti. Bu bağli daha net ifade edebilmek için mesafe ölçüm hatası  $e_w(d)$  olarak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [21]:

$$e_w(d) = \hat{d}_w - d \quad (6)$$

Yukarıdaki denklemde  $d$  alıcı ve verici arasındaki gerçek mesafeyi,  $\hat{d}_w$  ise bant genişliği  $W$  olan sistem tarafından ölçülen mesafeyi ifade etmektedir. Mesafe ölçüm hata modeli bir bütün olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$e_w(d) = e_{M,W}(d) + \varphi_w(d)e_{U,W}(d) \quad (7)$$

Denklemde  $e_{M,W}(d)$  çoklu yol etkilerinden kaynaklanan hatayı,  $e_{U,W}(d)$  ise UDP durumlarındaki hatayı temsil etmektedir ve her ikisinin de Gaussian dağılımlı olduğu gözlemlenmiştir [21]. Statik kanal şartlarında UDP durumlarının oluşumunun rastsal bir süreç olduğu gözlemlendiğinden [21]  $\varphi_w(d)$  statik kanal şartlarında UDP durumlarının bu özelliğini temsil eden bir rastsal değişkeni ifade etmektedir. Bu değişken belli bir  $P_{U,W}(d)$  olasılığı ile “1”,  $1 - P_{U,W}(d)$  olasılığı ile “0” değerini almaktadır. Dolayısıyla  $P_{U,W}(d)$  değeri UDP durumlarının oluşma olasılığını alıcı ve verici arasındaki gerçek mesafe ( $d$ ) ve bant genişliği  $W$ ’nin bir fonksiyonu olarak ifade etmektedir.  $\varphi_w(d)$ ’nin olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function; PDF) ise aşağıdaki denklemde ifade edilmiştir.

$$f_{\varphi_w}(x) = (1 - P_{U,W}(d))\delta(x) + P_{U,W}(d)\delta(x-1) \quad (8)$$

Çoklu yol etkilerinden kaynaklanan mesafe ölçüm hatası normalize edilmiş mesafe ölçüm hatası (normalized distance error)  $\beta_w$  yardımıyla aşağıdaki şekilde modellenmiştir.

$$e_{M,W}(d) = \beta_w \log(1 + d) \quad (9)$$

Yukarıdaki denklemde tanımlanan  $P_{U,W}(d)$  yakın mesafeler için  $P_{yakınU,W}$  ve uzak mesafeler için  $P_{uzakU,W}$  şeklinde adlandırılmış ve matematiksel modelin alındığı çalışmaya benzer olarak sınır değeri (breakpoint) 10 m seçilmiştir [21].

$$P_{U,W}(d) = \begin{cases} P_{yakınU,W} & d \leq 10m \\ P_{uzakU,W} & d > 10m \end{cases} \quad (10)$$

Netice olarak, ölçülen mesafe ( $\hat{d}$ ), gerçek mesafe ( $d$ ) ve mesafe ölçüm hatasını birbirine bağlayan genel hata modeli ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\hat{d} = d + \beta_w \log(1 + d) + \varphi_w(d)e_{U,W} \quad (11)$$

## 2.2. Dinamik Durum

Mobil robot referans noktalarına nazaran hareket halinde ise bu durumda robot ile referans noktaları arasındaki kanal koşulları da dinamik olarak değişeceği için direkt yoldan gelen sinyalin (veya kısaca direkt yolun) davranışı da değişecektir. Robotun o anda bulunduğu ortama göre bu durum değişken bir şekilde yukarıda anlatılan DDP ve UDP durumlarının oluşmasına yol açacaktır.

Bir önceki bölümde de ifade edildiği gibi statik durumlarda UDP koşullarının oluşmasını rastsal bir süreç olarak modellenmiştir. Bununla beraber, dinamik durumda biraz farklı bir durum söz konusudur [20]. Söz konusu çalışmalara göre UDP durumları kendi içinde iki temel başlık altında incelenebilir: **doğal UDP** (natural UDP; NUDP), ve **gölgeleme kaynaklı UDP** (shadowed UDP; SUDP). Doğal UDP durumu referans noktası ile robot arasında doğrudan görüş hattının olmadığı bir ortamda ve referans noktasının kapsama alanının sınırlarında meydana gelir. Sonuç olarak direkt yoldan gelen sinyalin gücü zayıflar ve alıcının sezim eşliğinin altında kaldığı için algılanamaz. Bu durumun temel sebebi referans noktası ile robotun arasındaki mesafenin çok büyük olmasıdır. Dolayısıyla doğal UDP durumu bina içi ortamın özelliklerinden bağımsız olarak meydana gelmektedir. Gölgeleme kaynaklı UDP durumunda ise direkt yoldan gelen sinyal büyük bir metalik nesne veya direkt yolu tıkayan başka bir cisim ile karşılaşır. Direkt yoldan gelen sinyal bu şekilde bloke olur ve gücünü ciddi derecede kaybeder. Netice itibarı ile direkt yoldan gelen sinyal alıcı sezim eşliğinin altında kalacak ve algılanamayacaktır. Her iki durumda da direkt yoldan farklı bir yolla gelen sinyal FDP olarak algılanmaktadır. Direkt yoldan farklı yollarla alıcıya ulaşan sinyallerdeki gecikme miktarı direkt yola göre çok daha yüksek olabileceği için yüksek mesafe ölçüm hataları söz konusudur.

Literatürde dinamik durumdaki mesafe ölçüm hataları, vericilerin sabit, alıcıların (mobil robotların) hareket halinde olduğu düşünülerek modellenmiştir. Modellemeye esas teşkil etmek üzere, kanalın herhangi bir zaman anında sadece 4 farklı durumdan birinde olabileceği farz edilmiştir. Bu durumlar DDP, S-UDP, N-UDP ve NC durumlarıdır. Bu durumların ilk üçünde mesafe ölçüm hataları sırasıyla; sinyalin gecikmesinden, verici ile alıcı arasında gölgeleme etkisine bağlı olarak sinyalin ciddi şekilde zayıflamasından ve yine verici ile alıcı arasında bulunan mesafenin çok fazla olması neticesinde sinyalin doğal olarak çok fazla zayıflamasından kaynaklanmaktadır. **Kapsama alanı dışında** olarak tarif edilebilecek NC (No Coverage) durumunda ise alıcı tüm vericilerin kapsama alanı dışındadır; böyle bir durumda alıcı ve verici arasında herhangi bir bağlantı olamayacağı için mesafe ölçümü de haliyle mümkün olmayacaktır. Böyle bir durumda mesafe ölçüm hatası da tanımsızdır. Dinamik durumun mesafe ölçüm hatalarına etkisinin gerçekçi olarak modellenmesi açısından NC senaryosunun da dikkate alınması gerekmektedir.

DDP durumundaki hata, aynen statik durumda olduğu gibi, parametreleri  $\mu_{DDP}$  ve  $\sigma_{DDP}$  olarak verilmiş Gaussian dağılıma sahip rastsal bir değişken olarak tanımlanabilir.

$$f(\varepsilon_{DDP}) = N(\mu_{DDP}, \sigma_{DDP}) \quad (12)$$

NUDP durumunda hatanın parametreleri  $\mu_{NUDP}$  ve  $\sigma_{NUDP}$  olarak verilen Gaussian (normal) dağılıma sahip rastsal bir değişken ile modellenilebileceği gösterilmiştir. Ancak burada verici ile alıcı arasındaki uzun mesafeden dolayı radyo sinyallerindeki zayıflama da dikkate alınmaktadır.

$$f(\varepsilon_{NUDP}) = N(\mu_{NUDP}, \sigma_{NUDP}) \quad (13)$$

Birinci ve ikinci durumlar benzer şekilde modellenirse de **Tablo 1**'den Gaussian dağılıma ait parametrelerdeki ciddi değişiklik açıkça görülebilir. DDP durumundan NUDP durumuna geçince standart sapma ( $\sigma$ ) değeri yaklaşık iki katına çıkarken ortalama ( $\mu$ ) değeri yaklaşık sekiz kat artmaktadır.

**Tablo 1.** DDP ve NUDP durumları için Gaussian dağılım parametreleri [20]

Kanal durumu	$\mu$	$\sigma$
DDP	0,0135	0,0105
NUDP	0,1063	0,0239

SUDP durumu için Mesafe ölçüm hatası değişkeni ilgili çalışmada geliştirilmiş uç dağılımı (generalized extreme value; GEV) dağılımı ile modellenmiştir.

$$f(\varepsilon_{SUDP}) = GEV(\mu_{SUDP}, \sigma_{SUDP}, \kappa_{SUDP}) \quad (14)$$

MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ LOKALİZASYONU

GEV dağılımı ise aşağıdaki olasılık yoğunluk fonksiyonu vasıtası ile tanımlanmıştır.

$$f(x|\kappa, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \cdot \exp\left[-\left(1 + \kappa \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right] \cdot \left(1 + \kappa \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{\kappa}} \quad (15)$$

Bu dağılımı karakterize eden  $\mu$ ,  $\sigma$ , ve  $\kappa$  parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** SUDP durumları için Gaussian dağılım parametreleri [20]

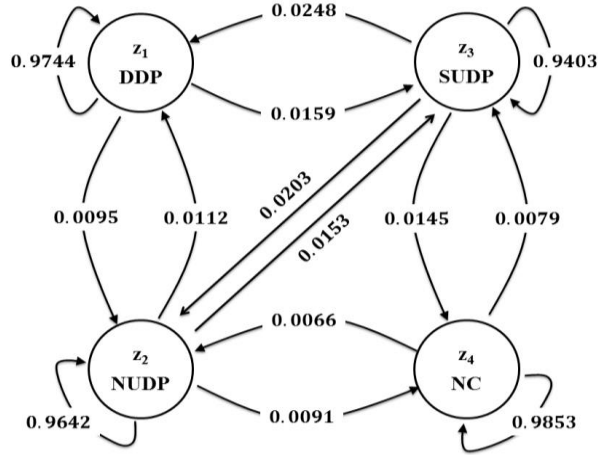
Kanal durumu	$\mu$	$\sigma$	$\kappa$
SUDP	2,5218	1,2844	0,4198

Direkt yolun dinamik davranışının istatistiksel olarak modellenmesinde **Markov Zinciri** (Markov chain) yöntemi kullanılmıştır [20]. Markov zinciri kavramı ışığında kanal, yapısı belli durumlar arasında stokastik olarak değişen bir sistem olarak düşünülebilir. Buna göre, gerekli durum uzayı (state space)  $Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4\} = \{DDP, NUDP, SUDP, NC\}$  olarak belirlenmiştir.

Markov zinciri kavramına göre davranan bir stokastik sistemin bir sonraki zaman anındaki durumu, sadece mevcut zaman anındaki durumuna bağlıdır. Başka bir deyişle, sistemin mevcut durumu, gelecekteki durumu etkileyebilecek tüm bilgiyi kapsamaktadır. Sistemin mevcut zaman anındaki ( $n$ ) durumu  $X_n$ , bir sonraki zaman anındaki ( $n+1$ ) durumu  $X_{n+1}$  ile gösterilirse, bu durum koşullu olasılık kavramı kullanılarak

$$P(X_{n+1} = x | X_n = x_n, \dots, X_1 = x_1) = P(X_{n+1} = x | X_n = x_n) \quad (16)$$

olarak ifade edilebilir. Başka bir deyişle, sistemin  $n$  anındaki durumu  $X_n = x_n$  ise,  $n+1$  anında  $X_{n+1} = x$  olma olasılığı sadece sistemin  $n$  anındaki durumunun  $X_n = x_n$  olma olasılığına bağlıdır.



**Şekil 4.** Bina içi konumlandırmada mesafe ölçüm hatasının dinamik davranışını temsil eden Markov modeli [20] (Durumlar arasında verilen sayısal ifadeler Durumlar arasındaki geçiş olasılıklarını ifade etmektedir.)

Yukarıda da ifade edildiği gibi, burada mevzu bahis olan sistem kanaldır. Kanal robotun hareketine göre her zaman anında DDP, NUDP, SUDP ve NC durumlarının birisinde olacak ve mesafe ölçüm hatasının miktarı da buna uygun şekilde değişecektir. Her zaman anında robot belli bir olasılıkla ( $P$ ) bir önceki zaman anında bulunduğu durumda kalacak, yine belli bir olasılık ( $1-P$ ) ile bir başka duruma geçiş yapacaktır. Bu olasılık değerleri ise literatürde **geçiş olasılığı** (transition probability) denilmektedir. Burada kanalın 4 farklı durumda

M. KANAAN, Z.A. KUŞ

olduğu göz önüne alındığında  $P_{ij}$  ( $i, j = 1, L, 4$ ) herhangi bir zaman anında  $i$  durumundan  $j$  durumuna geçiş olasılığını ifade etmektedir. Bu genel çerçeve dahilinde, kanalın tüm durumları arasındaki geçiş olasılıkları daha önceki çalışmalar kapsamında gerçek binalarda yapılan ölçümler vasıtası ile elde edilen  $4 \times 4$  boyutunda bir  $\mathbf{P}$  matrisi ile tanımlanabilir [20]. Bu matris aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9744 & 0.0095 & 0.0159 & 0 \\ 0.0112 & 0.9642 & 0.0153 & 0.0091 \\ 0.0248 & 0.0203 & 0.9403 & 0.0145 \\ 0 & 0.0066 & 0.0079 & 0.9853 \end{bmatrix} \quad (17)$$

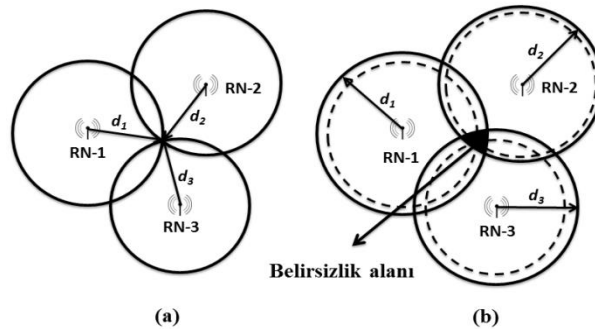
Kanalın dinamik yapısını gerçekçi bir şekilde ifade etmesi sebebi ile bu makalenin geri kalan kısımlarındaki tüm performans analizleri için yukarıda ifade edilen dinamik model esas alınmıştır.

### 3. LOKALİZASYON ALGORİTMALARI

Lokalizasyon amacıyla tasarlanan algoritmalar *model tanıma* (pattern recognition) esasına dayanan yöntemler ve *geometrik yöntemler* olarak iki temel başlık altında sınıflandırılabilir. Model tanıma esasına dayanan algoritmalar daha çok RSS yöntemi için tasarlanmış olmakla birlikte ulaşma zamanı yöntemi için tasarlanmış model tanıma algoritmalarının da bazı örnekleri vardır [24, 25]. Ulaşma zamanı parametresi kullanıldığında tercih edilen yöntemler daha ziyade geometrik yöntemlerdir. Bu yöntemlerde başlangıç noktası, alıcı (konum bilgisine ulaşılacak mobil robot) ile RN'lerin gerçek konumları arasındaki geometrik ilişkidir [26, 27]. Bu çalışma kapsamında ele alınan en küçük kareler ve ağırlıklı en küçük kareler yöntemleri geometrik yöntemlerdir. Algoritmaların görselleştirilmesi ve daha kolay anlaşılması açısından bu çalışmada odak noktası iki boyutlu lokalizasyon olacaktır; bununla beraber bu bölümde anlatılan temel prensiplerin hiçbir değişikliğe uğramaksızın üç boyutlu lokalizasyona da aynen uyarlanması mümkündür.

Geometrik yöntemler ile 2 boyutlu konum hesabı yapılması istendiğinde ilk yapılması gereken işlem sinyalin ulaşma zamanının değeri en az üç farklı RN tarafından ölçülmesidir. Ölçülen değerler ve kullanılan algoritma yardımıyla konum bilgisi hesaplanır (bkz. Şekil 5) [27]. Şekil 5'te RN-1, 2, 3: referans noktalarını,  $d_1$ - $d_3$ : ölçülen mesafeleri ifade etmektedir [26]. 3 boyutlu konum hesabı içinse en az dört farklı referans noktası ölçümünü kullanmak gerekecektir [28].

Çoklu yol ve benzeri durumların olmadığı ideal şartlar altında aynı düzlemdeki 3 daire geometrik olarak bir noktada kesişecektir ve bu nokta robotun konumunu ifade etmektedir. Şekil 5. (a)'da bu ideal durum gösterilmektedir. Şekil 5 (b)' de ise çoklu yol etkilerinin dikkate alındığı gerçek durumu temsil etmektedir. Bu şekilde verici ile alıcı arasındaki gerçek mesafeler kesikli çizgiler yardımıyla gösterilmiştir. Şekilde kesintisiz çizgilerle gösterilen ölçülen mesafelerin ise gerçek değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi radyo sinyallerinin çoklu yol etkilerinden dolayı normalden daha fazla gecikmesidir. Gecikme değerinin olduğundan yüksek olması ölçülen mesafe değerini de artıracaktır (bkz. Denklem 1). Neticede Şekil 5. (b)' de geometrik olarak gösterildiği gibi mobil robotun bir noktada değil ancak belirli bir alan içerisinde olabileceği söylenebilmektedir. Bu alan *belirsizlik alanı* olarak adlandırılabilir.



Şekil 5. Ulaşma zamanı yöntemi ile lokalizasyon: (a) ideal durum, (b) gerçek durum

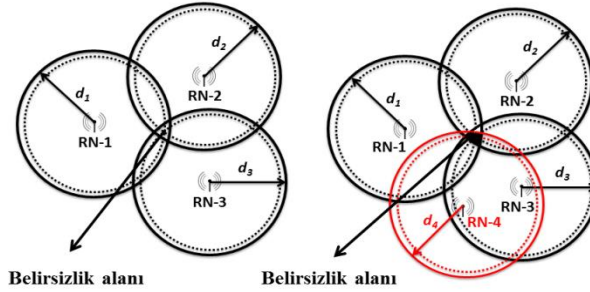


MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ LOKALİZASYONU

Şekil 5'teki senaryoda; mobil robotun konum koordinatlarını  $x_m$  ve  $y_m$  ile mobil robot ile referans noktaları (RN-1, RN-2, RN-3) arasında ölçülen mesafeler  $d_1$ ,  $d_2$  ve  $d_3$  ile temsil etmektedir. RN konum koordinatları sırasıyla  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  olmak üzere mobil robotun konum koordinatları aşağıdaki verilen nonlineer denklem kümesinin birlikte çözülmesiyle elde edilebilir.

$$\begin{aligned} d_1^2 &= (x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2 \\ d_2^2 &= (x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2 \\ d_3^2 &= (x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

Yukarıda verilen nonlineer denklem sisteminin çözülmesinde farklı yöntemler kullanılabilir ve aşağıda anlatılacak olan en küçük kareler ve ağırlıklı en küçük kareler teknikleri bunlara örneklerdir [27]. Gerçekçi durumda sistemdeki çoklu yol etkileri ve gürültü gibi bazı hata kaynaklarının bulunduğu durumlarda konumlandırmanın istenen hassasiyette yapılabilmesi için üçten fazla referans noktasının kullanılması gerekebilir. Bu şekilde ölçüm sayısının artmasıyla belirsizlik alanı küçülecektir. Şekil 6'da sisteme eklenen bir referans noktasıyla belirsizlik alanının nasıl azaldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 6. RN sayısının 3'ten 4'e çıkmasıyla belirsizlik alanının küçülmesi

### 3.1. En Küçük Kareler (LS) Tekniği

LS tekniği yardımıyla lokalizasyon yapılacağı zaman genelde aşağıdaki şekilde ifade edilen amaç fonksiyonunun değerini minimize etmek gerekecektir [29].

$$f(\mathbf{r}) = f(x, y) = \sum_{i=1}^N (\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \hat{d}_i)^2 \quad (19)$$

Denklem (19)'da  $N$  referans noktası sayısını; mobil robotun 2 boyutlu uzayda gerçek konumunu temsil eden bir  $\mathbf{r} = (x, y)^T$  noktası ile  $(x_i, y_i)$  konumunda bulunan bir referans noktası arasındaki gerçek mesafe karekök içerisindeki ifade ile verilmektedir.  $N$  adet referans noktası arasından  $i$ -nci referans noktası tarafından ölçülen mesafe  $\hat{d}_i$  ile verilmektedir. Buradan anlaşılacağı gibi, LS tekniğinde temel amaç, robotun konumunu ölçülen mesafe  $\hat{d}_i$  ile robotun  $i$ -nci referans noktasından olan uzaklığı arasındaki farklar toplamını en aza indirgeyecek şekilde robotun konumunu  $\hat{\mathbf{r}} = (\hat{x}, \hat{y})^T$  şeklinde hesaplamaktır.

LS tekniği kullanıldığında elde edilen lokalizasyonun kalitesi *kestirim kalanı* (residual) değerinden yola çıkılarak ortaya konulabilir. Kestirim kalanı amaç fonksiyonunun elde edilen lokalizasyon değerinde aldığı sayısal değer olarak (yani  $f(\hat{\mathbf{r}})$ ) olarak tanımlanır. Denklem (19)'da bu kalan değeri robotun hesaplanan konumunun gerçek konumuna eşit olduğu, yani  $(\hat{x}, \hat{y})^T = (x, y)^T$  iken tam olarak sıfıra eşit olacaktır. Dolayısıyla kestirim kalanı, LS tekniği ile elde edilen nihai sonucun kalitesinin somut göstergesi olarak değerlendirilebilir. Kestirim kalanı sıfırdan ne kadar yüksek ise elde edilen sonucun nihai kalitesi o kadar düşük demektir. Bir sonraki bölümde de görüleceği gibi, bu nokta ağırlıklı en küçük kareler tekniğinin de çıkış noktasını teşkil etmektedir.

M. KANAAN, Z.A. KUŞ

Kanal şartlarının temel hata kaynağı olduğu kabul edilir ve sistematik hata kaynakları göz ardı edilecek olursa, amaç fonksiyonun minimize edilmesinde bu kabulü dikkate alan bir LS algoritması kullanılabilir. Davidson tarafından geliştirilmiş LS algoritması buna bir örnektir ve Newton-Raphson türü yöntemlerin de bir örneğidir [30]. Yöntemde, denklem (19) ile verilen amaç fonksiyonunu minimize eden ve genellikle bir  $\mathbf{r}$  vektörü ile ifade edilen noktalar iteratif bir yaklaşımla aranır. Aşağıdaki denklemde ile  $\mathbf{r}$  vektörünün her bir iterasyonda nasıl güncellendiği ifade edilmektedir.

$$\mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{r}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{g}(\mathbf{r}_k) \quad (20)$$

Denklem (20)'de  $\mathbf{H}_k$ ,  $f(\mathbf{r})$  fonksiyonuna ait Hessian matrisinin tersinin yaklaşık bir şekilde hesaplanmış şeklini ifade eder. Newton-Raphson türü yöntemlerde Hessian matrisinin tersinin asıl değerinin her iterasyonda hesaplanması ciddi bir hesap yükünü beraberinde getireceğinden Davidson algoritması kapsamında söz konusu matrisin değerinin yaklaşık olarak hesaplanması tercih edilmektedir. Denklem (21)'de  $\mathbf{G}(\mathbf{r})$  matrisi  $f(\mathbf{r})$  fonksiyonuna ait Hessian matrisini temsil etmektedir.

$$\mathbf{G}(\mathbf{r}) = G_{jk}(r_1, r_2, \dots, r_N) \equiv \frac{\partial^2 f(r_1, r_2, \dots, r_N)}{\partial r_j \partial r_k} \quad (21)$$

Denklem (20)'de  $f(\mathbf{r})$  amaç fonksiyonunun gradyanını temsil eden  $\mathbf{g}(\mathbf{r})$  ise aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\mathbf{g}(\mathbf{r}) = \nabla f(\mathbf{r}) \quad (22)$$

Denklem (21) ile verilen  $\mathbf{G}(\mathbf{r})$  matrisinin hem pozitif-tanımlı (positive-definite) hem de simetrik olduğu görülmektedir. Dolayısıyla algoritmanın sağlıklı çalışabilmesi için iterasyonlar arasında  $\mathbf{H}_k$ 'nin her bir pozitif-tanımlı ve simetrik kaldığından emin olmak gerekmektedir. Bu amaçla  $\mathbf{H}_k$ 'nin her bir iterasyon sonrasındaki güncel değeri Denklem (23)'de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \frac{\lambda_k - 1}{\rho_k} \mathbf{m}_k \mathbf{m}_k^T \quad (23)$$

Yukarıdaki denklem kapsamında  $\mathbf{m}_k$  vektörü aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\mathbf{m}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{g}(\mathbf{r}_{k+1}) \quad (24)$$

Denklem (23)'deki  $\rho_k$  parametresi aşağıdaki denklemde ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\rho_k = (\mathbf{g}(\mathbf{r}_{k+1}))^T \mathbf{H}_k (\mathbf{g}(\mathbf{r}_{k+1})) = \mathbf{m}_k^T \mathbf{g}(\mathbf{r}_{k+1}) \quad (25)$$

Görüldüğü gibi denklem (25) ikinci dereceden bir denklemi ifade etmektedir. Bu sebeple  $\mathbf{H}_k$  pozitif-tanımlı olduğu sürece  $\rho_k$  parametresinin değeri sıfırdan büyük bir değer alacaktır.  $\rho_k$ 'nin sıfır değerini alması sadece  $\mathbf{g}(\mathbf{r})$ 'nin sıfır değerini alması ile mümkündür. Bu nedenle Denklem (25) algoritmanın sonlanması için genelde bir kriter olarak kullanılır. Pratikte  $\rho_k$  parametresi hiçbir zaman tam manası ile sıfır değerini almayacağından, algoritmanın çalışmasına  $\rho_k \leq \varepsilon$  durumunun sağlandığı durumda son verilebilir. Burada  $\varepsilon$  oldukça küçük bir tolerans değerini ifade etmektedir.

Bu kabullerden sonra geriye kalan tek işlem denklem (23) kapsamında  $\lambda_k$  değerinin doğru seçilmesidir. Denklem (23)'den anlaşılacağı üzere birbirini izleyen iterasyonlar boyunca  $\mathbf{H}_k$  matrisinin pozitif tanımlı kaldığından emin olmak açısından önem taşıyan bu değişkenin seçilmesi oldukça karışık bir işlemdir. Denklem (23)'den yola çıkarak  $\lambda_k$  değeri

$$\lambda_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_k + 1} \quad (26)$$

*MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ LOKALİZASYONU*

olarak ifade edilebilir. Denklem (26)'daki  $\gamma_k$  değişkeni ise aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\gamma_k \equiv -\frac{\mathbf{m}_k^T \mathbf{g}(\mathbf{r}_k)}{\rho_k} \quad (27)$$

Denklem (26) ve denklem (27)'den yola çıkarak  $\lambda_k$  değerinin seçilmesi  $\mathbf{H}_k$  'nın bir iterasyondan bir diğerine geçerken pozitif tanımlı kalmasını sağlar. Bir istisna olan  $\gamma_k = -1$  durumu ile karşılaşma ihtimalini dikkate alarak Davidon algoritması  $\gamma_k$  değerinden yola çıkarak  $\lambda_k$  değerinin belirlenmesinde farklı bir yöntem kullanır. Yöntemde ilk olarak değerleri daha sonra da belirlenebilecek olan  $\alpha$  ve  $\beta$  gibi iki sabit tanımlanır. Davidon algoritması bu kabuller ile aşağıdaki dönüşümü kullanır.

$$\Lambda(\gamma) = \begin{cases} \alpha & -\frac{\beta}{\beta+1} < \gamma < \frac{\alpha}{1-\alpha} \\ \beta & -\frac{\beta}{\beta-1} < \gamma < \frac{\beta}{\beta+1} \\ \frac{\gamma}{\gamma+1} & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (28)$$

### 3.2. Ağırlıklı En Küçük Kareler (RWGH) Tekniği

Residual weighting (RWGH) algoritması bir tür ağırlıklı en küçük kareler tekniğidir. Bu tekniğin temel amacı yukarıda anlatılan NLOS durumlarının konumlandırma üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmaktır [32, 33]. RWGH algoritmasının çalışma prensibi şu şekilde özetlenebilir. NLOS durumlarının neredeyse her defasında pozitif mesafe ölçüm hatalarına neden olduğu bilinmektedir [23]. Bu sebeple bu durumlarda konum hesabı işlemleri sonrasında LOS durumlarına göre daha yüksek kalanlar (residual) meydana gelmektedir (bkz. Denklem 19).

Diğer yandan konumlandırma sisteminin gereken minimum referans noktasından daha fazla referans noktasına sahip olduğu durumlarda (örneğin 2 boyutlu bir lokalizasyon için 3 RN), mesafe ölçümleri her grupta üç veya daha fazla sayıda ölçüm içerecek şekilde gruplandırılarak birleştirilebilir. Bu şekilde oluşturulan alt grupların her birinden birer LS konum kestirimi elde edilebilir. Elde edilen bu ara kestirimlerin bazılarının kalan (residual) değeri diğerlerinden daha az olacaktır. Bir diğer ifade ile bazı kestirimlerin kalitesi daha yüksek olacaktır. Daha az kalan değerine sahip ara kestirimlerin nihai konum hesabı üzerinde daha ciddi etkiye sahip olması sağlanabilirse daha doğru sonuçlar elde edilebilir. RWGH tekniği kapsamında her bir ara kestirim, kendisine ait kalanın tersiyle ağırlıklandırılır ve son konum hesabı bu ara kestirimlerin ağırlıklı toplamı olarak elde edilebilir.

RWGH algoritmasına göre referans noktalarının rapor edilen  $M$  adet ( $M > 3$ ) mesafe ölçümü farklı şekillerde gruplandırılır ve her grupta en az üç adet mesafe ölçümü yer almalıdır. Buna göre elde edilen toplam grup sayısı  $N$  ile ifade edilir ve

$$N = \sum_{i=3}^M \binom{M}{i} \quad (29)$$

olarak hesaplanabilir. Örneğin, 4 RN'li bir konumlandırma sistemi için RWGH algoritması dört grup, 5 RN'li bir konumlandırma sisteminde ise 10 grup oluşturacak ve her grupta üç veya daha fazla sayıda mesafe ölçümü bulunacaktır. Bu şekilde oluşturulan  $N$  adet grubun her biri birer küme olarak değerlendirilir ve her küme  $S_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) olarak ifade edilir.

Her küme için bir önceki bölümde anlatılan LS algoritması kullanılmak suretiyle bir konum hesabı ve bu konum hesabına ilişkin kalan değeri denklem (19) kullanılarak elde edilir. Bu aşamada elde edilen bu konum sonuçları sadece nihai konum kestirimi için kullanılacak ara kestirimlerdir. Ancak bir noktayı gözden kaçırmamak gerekir. Bu nokta, her kümedeki eleman sayısının (yani mesafe ölçüm sayısının) aynı olmaması, bundan dolayı da elde edilen ara kestirim kalitesinin eleman sayısından etkilenmesidir. Bu duruma istinaden, ara kestirimlerin nihai konum hesabına daha eşit ve objektif bir şekilde dahil edilmesi nihai lokalizasyonun kalitesini arttıracaktır.

M. KANAAN, Z.A. KUŞ

Nihai konum kestirimi için her ara kestirim kendisine ait kalanın tersi ile çarpılarak çözüme dâhil edileceğinden, öncelikle bu kalan değerlerinin küme boyutundan bağımsız hale getirilmesi gerekir. Bunun için de her ara kestirime ait kalan değeri, o kestirimi elde etmek için kullanılan  $S_k$  kümesinin ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) boyutuna (eleman sayısı) bölünerek normalize edilir. Bu bağlamda belli bir  $S_k$  kümesinden elde edilen ara kestirim  $\mathbf{r}'_k$ , bu ara kestirime dair elde edilen kalan değeri de  $R_{es}(\mathbf{r}'_k, S_k)$  ile ifade edilirse, bu ara kestirim için normalize edilmiş kalan değeri

$$\hat{R}_{es}^0(\mathbf{r}'_k, S_k) = \frac{R_{es}(\mathbf{r}'_k, S_k)}{S_k \text{ 'nin boyutu}} \quad (30)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Bu adımlardan sonra nihai konum hesabı  $\mathbf{r}'$  aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir ara kestirimlerin ağırlıklı bir toplamı olarak aşağıdaki denklemde ifade edildiği şekilde elde edilir.

$$\mathbf{r}' = \frac{\sum_{k=1}^N \mathbf{r}'_k (\hat{R}_{es}^0(\mathbf{r}'_k, S_k))^{-1}}{\sum_{k=1}^N (\hat{R}_{es}^0(\mathbf{r}'_k, S_k))^{-1}} \quad (31)$$

### 3.3. Hata Kestirim Yöntemi ile Algoritmaların Performansının İyileştirilmesi

UDP ve özellikle SUDP durumlarında karşılaşılan mesafe ölçüm hatalarının oldukça yüksek değerlerde olabileceği bilinmektedir [20]. Kanalın UDP durumlarında olup olmadığı bir şekilde saptanır ve bu durumlarda meydana gelen hata miktarı kestirilebilir ise bu durumun üstesinden gelmek mümkün olabilir. Kanalın hangi durumda olduğu, hipotez testleri yardımıyla; istatistiksel olarak kestirilebilir [33]. Prensip olarak mobil robot bağlantıda olduğu her RN için farklı kanal şartlarına maruz kalabileceğinden bu kanal durumu kestiriminin her RN için ayrı ayrı yapılması gerekir.

Belli bir RN ile robotun arasındaki kanalın o anki durumu bir şekilde kestirildikten sonra UDP durumlarının etkilerini azaltmak için bazı önlemler alınabilir. Mesela, nihai konum hesabı yapılırken UDP durumlarından etkilendiği tespit edilen mesafe ölçümleri çözüme dâhil edilmeyebilir. Tabii bu stratejinin uygulamaya konabilmesi için eldeki toplam mesafe ölçümü sayısının asgari sayının (iki boyutlu lokalizasyon için bu sayı üçtür) üstünde olması gerekmektedir. Ancak bina içi ortamlarda kapsama alanı sınırlamaları, gölgeleme gibi muhtelif durumlardan dolayı aynı anda çok sayıda RN ile iletişim kurmak genelde mümkün olmadığından bu gerçekçi bir strateji olmayabilir. İzlenebilecek daha gerçekçi bir diğer yol ise UDP durumlarından etkilenmiş mesafe ölçümlerindeki hataları yaklaşık olarak hesaplamak ve bu hataları bir şekilde azaltmaya çalışmaktır. UDP durumlarından etkilenmiş mesafe ölçümlerinin bu şekilde onarıldıktan sonra lokalizasyon için kullanılması daha hassas lokalizasyona zemin hazırlayacaktır [34].



Şekil 7. Hata kestirimi ile lokalizasyon algoritmasının genel yapısı

Şekil 7’de ifade edildiği gibi her bir RN için kanal durumu, ilgili RN tarafından rapor edilen hatalı mesafe ölçümünün hipotez testlerine tabi tutulmasıyla kestirilir. Bu hipotez testleri ise ilgili kanal durumuna dair istatistiksel hata modelleri üzerinden tasarlanabilir. Açık literatürde hipotez testlerinin tasarımı konusunda bayağı fazla sayıda çalışma olduğundan (daha fazla detay için bkz. [35-37]) bu konu mevcut çalışma kapsamının dışında tutulmuş ve kanalın durumunun hassas bir şekilde tespit edilebildiği varsayılarak mesafe ölçümlerindeki hatanın azaltılması ve bunun da lokalizasyon algoritmalarının performansı üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

Kanalın durumu hipotez testleri vasıtası ile kestirildikten sonra, ilgili mesafe ölçümlerini onarmak için aşağıdaki yol takip edilir. Daha önceki bölümlerden de hatırlanacağı gibi, bir RN ile robot arasındaki ölçülen mesafe ( $\hat{d}$ ) ile gerçek mesafe ( $d$ ) arasındaki ilişki

## MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ LOKALİZASYONU

$$\hat{d} = d + e \quad (32)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu denklemde  $e$  ilgili RN ile robot arasındaki kanal koşullarına bağlı olarak değeri ve istatistiksel davranışı değişen rastsal mesafe ölçüm hatasını simgelemektedir. Bölüm 2.2’de de detaylı olarak anlatıldığı üzere kanalın tüm farklı durumlarındaki mesafe ölçüm hatasına dair istatistiksel modeller bilinmemektedir. Bu modeller esas alınarak belli bir kanal durumu için yaklaşık mesafe ölçüm hatası, o kanal durumu için kullanılan modelin birinci momenti (ortalama değeri) olarak ifade edilebilir. Başka bir deyişle, kestirilen hata miktarı ( $\hat{e}$ )

$$\hat{e} = E\{e\} \quad (33)$$

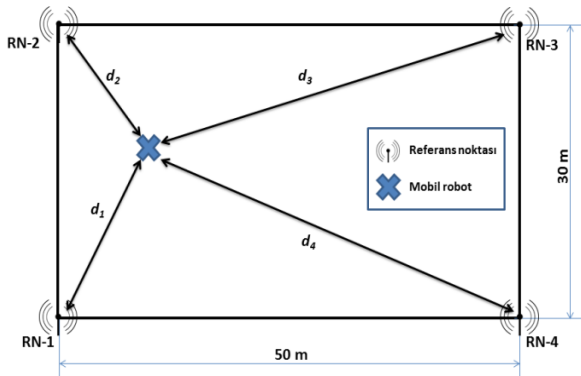
olarak ifade edilir. Bu şekilde mesafe ölçümündeki hata miktarı kestirildikten sonra ölçüm

$$d' = \hat{d} - \hat{e} \quad (34)$$

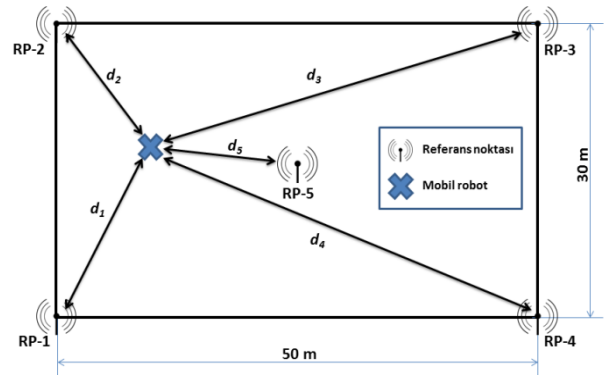
şeklinde onarıldıktan ve bu şekilde hata miktarı azaltıldıktan sonra lokalizasyon işlemlerinde kullanılabilir.

#### 4. PERFORMANS ANALİZİ METODOLOJİSİ

Bir önceki bölümde detayları verilen LS ve RWGH algoritmalarının performansı simülasyon ortamında analiz edilmiştir. Bu analiz için 30 m × 50 m boyutlarında bir bina içi ortam belirlenmiştir. Bu alanın içinde konumları binanın lokal koordinat sistemine göre referans noktaları (RN) mobil robota kendi konumunu belirlemesi için RF sinyalleri yaymakta, robot da algıladığı bu sinyalleri kullanarak kendi konumunu belirlemektedir. Bu ortam içinde mobil robotun belli bir yörünge içinde hareket ettiği farz edilmiştir. Mobil robotun kendi konumu da yine bu koordinat sistemine göre belirlenecektir. Bina içi ortamda kullanılan RN sayısının algoritmaların performansına nasıl etki edebileceğini irdelemek açısından kullanılan RN sayısı 4 ve 5 gibi iki farklı değer olarak alınmıştır. Bina içi ortam, kullanılan RN konumları ile beraber şematik olarak Şekil 8 ve Şekil 9’da gösterilmektedir. Ortam içinde robotun takip ettiği yörünge ise Şekil 10’da gösterilmektedir. Bu yörünge toplam 105 farklı noktadan oluşmaktadır.



Şekil 8. Bina içi ortam ve bu ortamdaki 4 RN'nin konumları

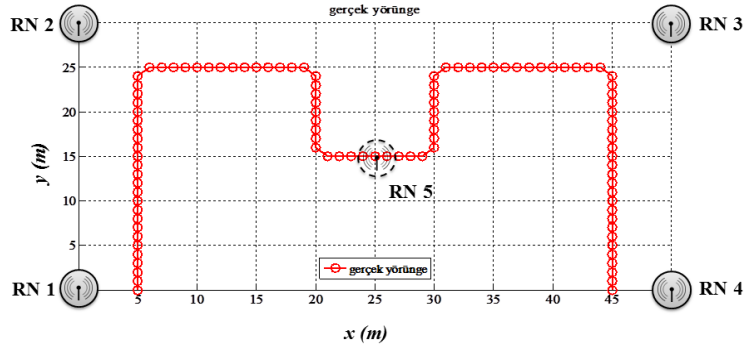


Şekil 9. Bina içi ortam ve 5 RN'nin konumları

Kanal koşullarının ise bu makalenin ikinci kısmında bahsedilen dinamik model dâhilinde DDP, NUDP, SUDP ve NC durumları arasında rastgele bir şekilde değiştiği varsayılmaktadır. Bu değişimlerin denklem (16)'da belirtilen durum değişim olasılıkları ile cereyan ettikleri kabul edilmiştir. Dolayısıyla mobil robot yörüngesinin içinde o anda bulunduğu noktaya göre bazı referans noktalarından DDP, diğerlerini NUDP veya SUDP temelli mesafe ölçüm hataları görecektir, bazılarının ise kapsama alanı dışında olduğu için NC koşullarını tecrübe edecektir. Fakat bu noktada cevaplandırılması gereken bir başka soru daha vardır: yörüngesinin başlangıç noktasındaki kanal koşulları nasıl belirlenecektir? Bu soruyu aslında iki şekilde cevaplamak mümkündür. İlk olarak, her referans noktasından robota ulaşan sinyal gücüne dayanarak kanal koşulları tahmin edilebilir. İkinci bir yol ise yörüngesinin başlangıç noktasında robotun her referans noktasına olan asıl mesafesini dikkate almak,

M. KANAAN, Z.A. KUŞ

her referans noktası ile robot arasındaki kanal koşullarını bu yolla tahmin etmeye çalışmaktadır. Bu makale kapsamında ikinci yol benimsenmiş, buna ek olarak da her RN ile robot arasında gölgeleme koşullarının belli bir olasılıkla oluşabileceği varsayılmıştır. Gölgeleme koşullarının varlığı  $\chi$  olarak tanımlanan, ve sadece '1' ve '0' değerleri alan ikili bir rastsal değişken ile modellenmiştir. Buna göre belli bir referans noktasına istinaden  $\chi=1$  ise bu o referans noktası ile robot arasında gölgeleme koşullarının varlığını,  $\chi=0$  ise gölgeleme durumunun söz konusu olmadığını ifade etmektedir [20].  $d_1$ ,  $d_2$  ve  $d_3$  şeklinde üç mesafe kesim noktası tanımlayarak başlangıç kanal koşulları aşağıdaki Tablo 3'e uygun şekilde tespit edilebilir. Bu çalışma kapsamında  $d_1 = 36$  m,  $d_2 = 70$  m,  $d_3 = 60$  m olarak belirlenmiştir. Bu değerler orijinal çalışmada belirtilen kesim noktası değerlerin ( $d_1 = 18$  m,  $d_2 = 35$  m,  $d_3 = 30$  m) tam iki katı olarak belirlenmiştir [20]. Bu ayarlamaların yapılmasının sebebi dinamik modelin geliştirilmesi için esas alınan bina içi ortama nazaran mevcut çalışma kapsamında referans noktalarının birbirlerinden çok daha uzakta olmalarıdır. Çalışma esnasında bu kesim noktalarının orijinal değerleri de denenmiş, fakat tanımlanan bina içi ortam boyutlarında (30 m  $\times$  50 m) RN'ler arası uzaklığın daha fazla olmasından dolayı çok fazla NC kanal koşulunun oluştuğu ve bundan dolayı mesafe ölçümleri yapılamadığından simülasyonların çalıştırılmadığı görülmüştür. Bundan dolayı mevcut çalışmada RN'ler arasındaki mesafenin daha fazla olduğu durumu dikkate alarak tüm kesim noktası değerleri iki katı oranında artırılmıştır.



Şekil 10. Performans analizi için belirlenen mobil robot yörüngesi

Tablo 3. Yörünge başındaki durum tespiti

Mesafe	Gölgeleme Etkisi ( $\chi$ )	Kanal durumu
$d < d_1$	0	DDP
$d_1 < d < d_2$	0	NUDP
$d < d_3$	1	SUDP
$d > d_2$	0	NC
$d > d_3$	1	NC

Yukarıdaki arka plan esas alınarak, simülasyonlar kapsamında dört farklı sistem senaryosu tanımlanmıştır.

Tablo 4'den de görüleceği gibi, bu dört senaryoyu birbirinden ayıran temel parametreler, RN sayısı ve gölgeleme durumunun oluşma olasılığıdır ( $P(\chi=1)$ ).

Tablo 4. Simülasyon senaryoları

Senaryo Adı	RN Sayısı	$P(\chi=1)$
Senaryo 1	4	% 9
Senaryo 2	4	% 61
Senaryo 3	5	% 9
Senaryo 4	5	% 61

**MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ LOKALİZASYONU**

Her senaryo kapsamında, yörüngedeki her nokta için o senaryoda yer alan tüm RN'lere gerçek mesafeler hesaplanmış, bunun üzerine belli bir miktar mesafe ölçüm hatası eklenmiştir. Yörünge üzerindeki belli bir nokta ve RN için, eklenen mesafe ölçüm hatasının miktarı, rastgele olarak değişmekte ve kanal koşullarına göre (DDP, NUDP veya SUDP) belli istatistiksel dağılım fonksiyonları kullanılarak belirlenmektedir. Bu şekilde mesafe ölçüm hatasına maruz kalmış ölçümler, ilgili lokalizasyon algoritması (LS veya RWGH) tarafından işlenerek robotun konumu hesaplanmaktadır.

Son olarak lokalizasyon algoritmalarının performansını sayısal olarak değerlendirmek için uygun bir performans ölçütü tanımlanmalıdır. Lokalizasyon problemi kapsamında bu performans ölçütü gerçek konum ile algoritma tarafından tespit edilen konum, başka bir deyişle lokalizasyon hatasıdır. Bu çalışma kapsamında, yörüngedeki her noktanın iki boyutlu uzaydaki gerçek konumu ( $\mathbf{r}_{gerçek} = (x_{gerçek}, y_{gerçek})^T$ ) algoritmalar vasıtasıyla hesaplanan konumu ( $\mathbf{r}_{hesap} = (x_{hesap}, y_{hesap})^T$ ) ile karşılaştırılmış ve bu iki vektörün arasındaki farkın genlik değerinin karesi lokalizasyon hatası ölçütü olarak alınmıştır. Robotun hareket yörüngesinin tamamındaki 105 noktanın her biri için bu işlem yapılmış, yörüngenin tamamı için gerçek konumlar ile hesaplanan konumlar arasındaki farkların ortalaması alınmıştır. Mesafe ölçüm hatalarının rastgele değişmesinden dolayı lokalizasyon hataları da rastgele olarak değişecektir. Hataların ortalamasını  $E\{g\}$  operatörü (birinci moment) olarak ifade ederek, performans ölçütü **RMSE** (Root Mean Square Error) olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$RMSE = \sqrt{E\{(|\mathbf{r}_{gerçek} - \mathbf{r}_{hesap}|)^2\}} \quad (35)$$

RMSE yolu ile bir lokalizasyon algoritmasının robotun ilgili yörüngeyi bir defa kat etmesi esnasında görülen lokalizasyon hataları sayısal olarak ifade edilebilir. Bununla beraber, yörüngenin gerek başlangıç noktasındaki, gerekse de diğer noktalarının her birinde kanal koşullarının rastgele olarak değiştiği düşünüldüğünde, istatistiksel açıdan robotun simülasyon ortamında aynı yörüngeyi bir defadan fazla kat etmesi gerekir. Yörünge baştan sona her kat edildiğinde bir RMSE değeri hesaplanacaktır. Dolayısıyla daha gerçekçi bir performans ölçütü her yörünge bitiminde hesaplanan RMSE değerlerinin ortalaması olacaktır. Yörüngenin  $N$  defa kat edildiği düşünüldüğünde ilgili performans ölçütü **ARMSE** (Average Root Mean Square Error) olarak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$ARMSE = \frac{\sum_{j=1}^N RMSE_j}{N} \quad (36)$$

3. bölümde bahsedilen algoritmaların performanslarını istatistiksel açıdan anlamlı bir şekilde ortaya koyabilmek açısından bu çalışma kapsamında  $N = 10000$  olarak seçilmiştir. Dolayısıyla makalenin geri kalan kısmındaki tüm performans ölçütleri ARMSE değerleri olarak ifade edilecektir.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1. LS ve RWGH Algoritmalarının Kendi Başlarına Performans Analizi

Tüm senaryolar için LS ve RWGH algoritmaları kendi başlarına kullanımı vasıtası ile elde edilen performans verileri Tablo 5'de verilmektedir.

**Tablo 5.** Tüm senaryolara ait performans sonuçları

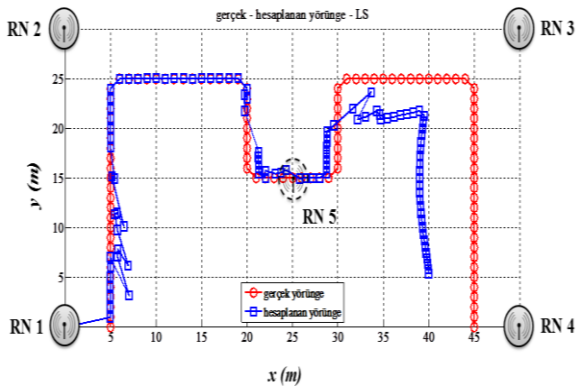
Algoritma	ARMSE (m)			
	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4
<b>LS</b>	10,81	11,58	10,89	11,61
<b>RWGH</b>	5,07	6,05	5,35	5,95

Tablo 5'teki sonuçlardan da görüldüğü üzere, RWGH algoritmasındaki ARMSE değerleri, senaryoya bağlı olarak ortalama %50 oranında daha düşüktür. Başka bir deyişle mobil robot lokalizasyon problemi için LS

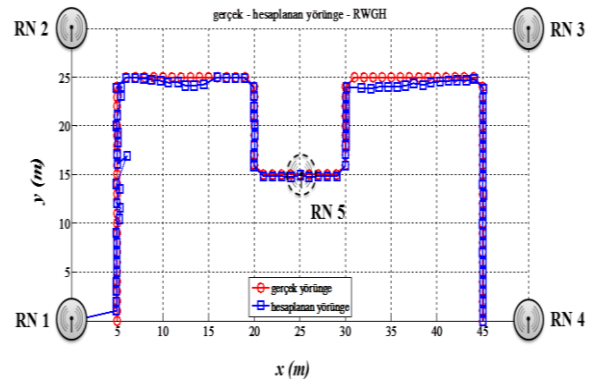
M. KANAAN, Z.A. KUŞ

yerine RWGH algoritmasının kullanımı ortalama %50 oranında bir performans artışı sağlamaktadır. İki algoritmanın performanslarını görsel olarak karşılaştırmak için her iki algoritma ile hesaplanan yörüngeler Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmiştir. Makaleyi mümkün mertebe kısa ve öz tutmak amacı ile verilen şekiller sadece senaryo 3’teki tek bir yörünge takibi ile sınırlı tutulmuştur; Tablo 5’teki sonuçlara bakarak benzer görsel sonuçların diğer senaryolarda da elde edilebileceği aşikârdır.

RWGH algoritmasının LS algoritmasına göre sağladığı performans avantajı, RWGH algoritmasının yapısından kaynaklanmaktadır. RWGH algoritması kapsamında bir konum kestiriminin kalitesinin ölçütü o kestirime dair hesaplanan kalan değeridir. Bilhassa UDP kanal koşulları söz konusu olduğu zaman, RWGH algoritmasının içinde elde edilen ara kestirimlerin kalan değerleri daha yüksek olmakta, algoritma da nihai konum hesabını yaparken bu ara kestirime daha az ağırlık vermektedir. Bu sebeplerden dolayı RWGH algoritması LS algoritmasına göre daha hassas lokalizasyon yapabilmektedir. RN sayısının 4’den 5’e çıkarıldığı senaryo 3 ve senaryo 4’de iki algoritma arasındaki performans farkı daha belirgin hale gelmektedir. Artan RN sayısı RWGH algoritması açısından daha fazla sayıda kombinasyona yol açtığı için kaliteli ara kestirime ulaşma ihtimali artmakta, bu da nihai lokalizasyonun daha hassas bir şekilde yapılmasına imkan tanımaktadır.



Şekil 11. LS algoritması için gerçek ve hesaplanan yörünge karşılaştırması



Şekil 12. RWGH algoritması için gerçek ve hesaplanan yörünge karşılaştırması

## 5.2. LS ve RWGH Algoritmalarının Hesaplama Karmaşıklığı Analizi

LS ve RWGH algoritmalarının performanslarını karşılaştırmanın başka bir yolu da bu algoritmaların işlem karmaşıklıklarının (computational complexity) karşılaştırılmasıdır. Bir algoritma için işlem karmaşıklığını ifade etmenin bir yolu yürütme zamanı (execution time) değerinin belirlenmesidir. LS ve RWGH algoritmalarının her biri için RN sayısı 4 ten başlayarak birer birer artırılmış ve 8’e kadar çıkartılarak yürütme zamanının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Bu aşamadaki simülasyon çalışmalarında da robotun hareket ettiği yörüngeyi 10000 defa takip ettiği dikkate alınmıştır. RN sayısı bu analiz için problem boyutu (problem size)  $n$ ’nin bir ölçütü olarak kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Matlab yazılımının eğri uydurma modülü aracılığı ile değerlendirilmiş ve problemin büyüklüğü (problem size) ile yürütme zamanı arasındaki ilişki analiz edilmiştir.

Eğri uydurmanın kalitesi üzerinde  $R^2$  değerinin önemi bilinmektedir [38].  $R^2$  değerinin yüksek olması regresyon model uyumunun iyi olduğunu gösterir. Bu amaçla kullanılan bir diğer uyum indeksi ise düzeltilmiş  $R^2$  değeridir. Bu değer  $R^2$  değerine göre daha sağlıklı bir metrik uyum indeksi oluşturur. Algoritmaların işlem karmaşıklıkları belirlenirken bu değerler birlikte dikkate alınmıştır. Eğri uydurma denemeleri neticesinde LS algoritması  $R^2$  değerinin 0,97 ve düzeltilmiş  $R^2$  değerinin ise 0,91 olarak hesaplandığı üçüncü dereceden bir polinom ile modellenmiştir. Elde edilen sonuç Şekil 13’te verilmektedir.

RWGH algoritması için optimum modelleme;  $R^2$  değerinin 1 ve düzeltilmiş  $R^2$  değerinin 0,99 olduğu üçüncü dereceden bir polinom ile elde edilmiştir (Şekil 14).

Şekil 13 ve 14 incelendiğinde LS ve RWGH algoritmalarının her ikisi için işlem karmaşıklığı  $t=O(n^3)$  ile ifade edilebileceği görülmektedir.

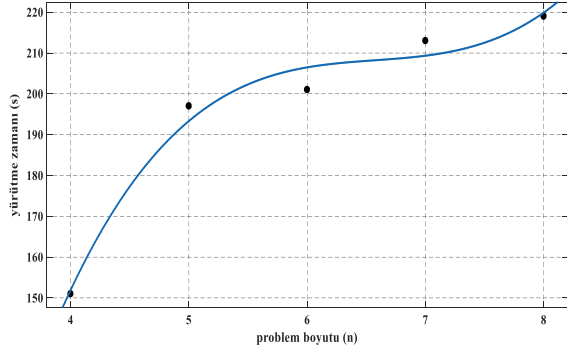
## 5.3. Hata Kestirim Metodu ile Performans Analizi

Bu bölümde LS ve RWGH algoritmalarının hata kestirim metodu ile beraber kullanıldıkları zaman elde edilen performans sonuçları ele alınacaktır. Bölüm 3.3’ten de hatırlanacağı gibi, hata kestirim metodunun temel amacı yapılan hatalı mesafe ölçümlerini, algoritma tarafından kullanılmadan evvel bir işleme tabi tutarak hataları

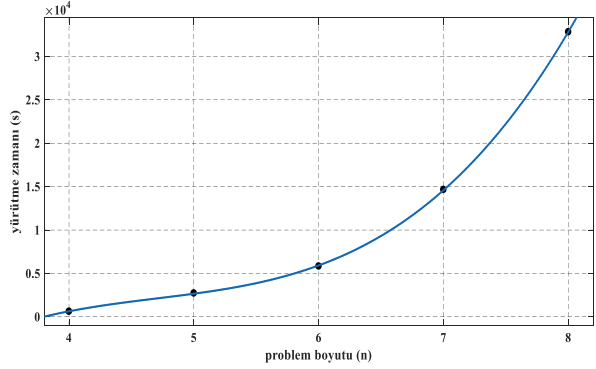


MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ LOKALİZASYONU

azaltmak, bu şekilde algoritmaya daha kaliteli mesafe ölçümleri göndererek daha hassas lokalizasyon yapılabilmesini sağlamaktır.



Şekil 13. LS algoritması için RN sayısı ile yürütme zamanı arasındaki ilişki



Şekil 14. RWGH algoritması için RN sayısı ile yürütme zamanı arasındaki ilişki

Hata kestirim metodunun kanal koşullarından kaynaklanan mesafe ölçüm hatalarını gerçekten azaltıp azaltmadığını net olarak irdelemek için bütün senaryolar için mesafe ölçümlerindeki hataların hata kestirimi öncesi ve sonrasında istatistiksel analizi yapılmıştır. RN ile robot arasındaki gerçek mesafe  $d$ , ölçülen mesafe ise  $\hat{d}$  olarak ifade edilirse, hata kestirimi öncesi mesafe ölçüm hatası bir rastsal değişken olarak

$$e = \hat{d} - d \tag{37}$$

şeklinde ifade edilebilir. Hata kestirimi işlemi sonrasında düzeltilmiş mesafe ölçümü  $d'$  ile gösterilirse, hata kestirimi sonrası mesafe ölçüm hatası yine bir başka rastsal değişken olarak

$$e' = d' - d \tag{38}$$

şeklinde ifade edilir. Bütün senaryolar kapsamında  $e$  ve  $e'$  ortalama ve standart sapma değerleri simülasyon sonuçlarından tespit edilmiş ve Tablo 6'da toplu olarak verilmiştir. Tablodaki sonuçlardan hata kestirimi işlemi sonucu mesafe ölçüm hatalarının ortalama ve standart sapma değerlerinde belirgin bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu da hata kestirim metodunun mesafe ölçüm hatalarını azaltmakta etkili olduğunun somut bir göstergesidir.

Tablo 6. Hata kestirim metodu öncesi ve sonrası mesafe ölçüm hatası istatistikleri

Senaryo	$e$		$e'$	
	Ortalama (m)	Std. sapma (m)	Ortalama (m)	Std. sapma (m)
Senaryo 1	0,96	2,96	-0,22	2,55
Senaryo 2	1,27	3,41	-0,29	3,00
Senaryo 3	0,94	2,92	-0,21	2,51
Senaryo 4	1,26	3,54	-0,28	3,14

LS ve RWGH algoritmalarının, senaryo 1 durumunda hata kestirimli ve hata kestirimi olmadan elde edilen performansları Tablo 7'de gösterilmektedir. Tablodan da görüldüğü gibi, her iki algoritma için hata kestirimi tekniğinin kullanılması belli bir performans iyileşmesi (yani ARMSE değerlerinde düşüş) sağlamıştır. Ancak LS algoritmasında bu performans iyileşmesi yaklaşık %5 civarlarında iken RWGH algoritmasında yaklaşık %17 civarlarındadır. RWGH algoritmasının daha önceki bölümlerde anlatılan teorik yapısı, daha az hata içeren mesafe ölçümleri ile daha hassas lokalizasyon yapılabilmesine imkan tanımıştır.

Tablo 7. LS ve RWGH algoritmalarının hata kestirimi ile performans karşılaştırması (Senaryo 1)

Algoritma	ARMSE (m)	
	Hata Kestirimsiz	Hata Kestirimi ile

M. KANAAN, Z.A. KUŞ

<b>LS</b>	10,81	10,23
<b>RWGH</b>	5,07	4,19

Senaryo 2 için LS ve RWGH algoritmalarının yine hata kestirimli ve hata kestirimi olmadan performans karşılaştırması Tablo 8’de verilmektedir. Aynen ilk senaryoda olduğu gibi burada da hata kestirimi metodu hem LS, hem de RWGH algoritması için belli bir performans iyileşmesine yol açtığı bu sonuçlarda da açıkça görülmektedir. Her iki algoritma için elde edilen performans iyileşmesinin yüzde olarak oranı, senaryo 1’e yakındır ve LS için yaklaşık %5, RWGH için ise yaklaşık %17 oranındadır.

**Tablo 8.** LS ve RWGH algoritmalarının hata kestirimi ile performans karşılaştırması (Senaryo 2)

Algoritma	ARMSE (m)	
	Hata Kestirimsiz	Hata Kestirimi ile
<b>LS</b>	11,58	11,00
<b>RWGH</b>	6,05	5,06

Senaryo 3 için yine benzer bir performans karşılaştırması Tablo 9’da verilmektedir. İlgili sonuçlar incelendiğinde her iki algoritma için bu senaryoda da hata kestirimi metodunun kullanılması sonucu belli bir performans iyileşmesi sağlandığı görülmektedir. LS algoritması için bu performans iyileşmesi yaklaşık %5 oranında, RWGH algoritması için ise yaklaşık %11 oranındadır.

**Tablo 9.** LS ve RWGH algoritmalarının hata kestirimi ile performans karşılaştırması (Senaryo 3)

Algoritma	ARMSE (m)	
	Hata Kestirimsiz	Hata Kestirimi ile
<b>LS</b>	10,89	10,42
<b>RWGH</b>	5,35	4,78

Son olarak, senaryo 4 için LS ve RWGH algoritmalarının performansları karşılaştırmalı olarak Tablo 10’da verilmektedir. Diğer senaryolar ile uyumlu olarak, hata kestirimi metodunun kullanılması sonucu her iki algortmada da belli bir performans iyileşmesi söz konusudur. Bu senaryo kapsamında performans iyileşmesi LS algoritması için yaklaşık %4,5, RWGH algoritması için ise yaklaşık %13 civarındadır.

**Tablo 10.** LS ve RWGH algoritmalarının hata kestirimi ile performans karşılaştırması (Senaryo 4)

Algoritma	ARMSE (m)	
	Hata Kestirimsiz	Hata Kestirimi ile
<b>LS</b>	11,61	11,09
<b>RWGH</b>	5,95	5,18

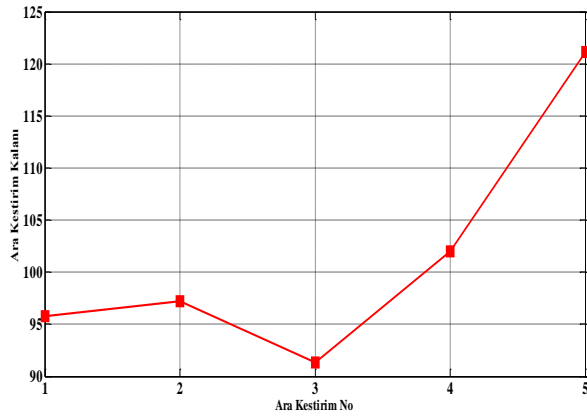
Yukarıdaki sonuçlar bir bütün olarak incelendiğinde, LS algoritmasının hata kestirim metodu ile beraber kullanıldığında senaryolardan bağımsız olarak %4 ila %5 oranında bir performans iyileşmesi elde edildiği görülmektedir. RWGH algoritmasında ise, hata kestirim metodu senaryo 1 ve 2’de yaklaşık %17 oranında bir performans iyileşmesi sağlarken senaryo 3 ve 4’de ise %11 ila %13 oranında bir performans iyileşmesi sağlamaktadır. Görüldüğü gibi, hata kestirimi algoritmasının kullanımı sonucu, senaryo 3 ve 4’de RWGH algoritması için Senaryo 1 ve 2’ye nazaran daha az bir performans artışı gerçekleşmiştir. Senaryo 3 ve 4’de RN sayısının arttığı düşünüldüğünde bu açıklanması gereken bir bulgudur. Konuya açıklık getirmek için 4 RN kullanılan senaryolar ile 5 RN kullanılan senaryolar karşılaştırılmalıdır. Makaleyi mümkün mertebe kısa ve öz tutmak adına sadece 1 ve 3 no’lu senaryoların karşılaştırması burada verilmiştir; ancak benzer bir durumun 2 ve 4 no’lu senaryolar için de geçerli olduğu görülmüştür.

1 no’lu senaryo için RWGH algoritması kapsamında elde edilen tüm ara kestirimlerin ortalama kalan değerleri Şekil 16’de gösterilmektedir. Hatırlanacağı gibi, bu senaryo kapsamında 4 adet RN kullanılmakta, RWGH

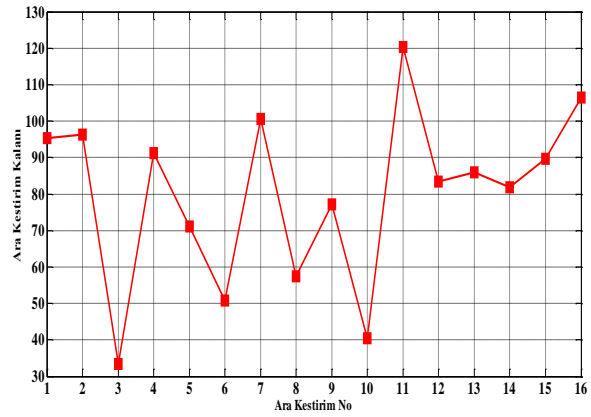
**MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ LOKALİZASYONU**

algoritması toplam 5 adet ara kestirim hesaplayarak her birini kendi kalan değeri ile ağırlıklandırmak sureti ile son kestirimi hesaplamaktadır. Bu grafiğin elde edilmesi için robotun hareket ettiği yörüngeyi oluşturan 105 noktadaki ara kestirimlerin kalan değerleri alınmış, yörüngeyi de simülasyon kapsamında 10000 defa çalıştığı düşünülerek toplam  $105 \times 10000 = 105000$  kalan değerinin ortalaması alınarak Şekil 15'te sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi ilgili ara kestirim kalan değerleri 90 ile 120 arasında değişmektedir ve bir ara kestirimin kalan değeri (ara kestirim no. 5) diğerlerine göre biraz daha yüksektir. Dolayısıyla bu senaryo kapsamında RWGH algoritması yaklaşık birbirine yakın kalitede 4 adet ve biraz daha düşük kaliteli 1 adet ara kestirim üzerinden son konum hesabını yapmaktadır.

5 RN'nin kullanıldığı 3 no'lu senaryoda ise biraz farklı bir durum söz konusudur. Bu senaryo için elde edilen ara kestirimlerin ortalama kalan değerleri bir önceki paragrafta anlatılan şekilde hesaplanmış ve Şekil 16'da gösterilmiştir. Burada toplam 16 adet ara kestirim söz konusudur. Şekilden de görüldüğü gibi burada ortalama kalan değerleri 1 no'lu senaryoya göre çok daha geniş bir aralıkta (30 ila 120 aralığında) seyretilmektedir. Söz konusu 16 adet ara kestirimden 4 tanesi diğerlerine göre daha düşük ortalama kalan değerlerine sahip, dolayısıyla daha kalitelidir (3, 6, 8 ve 10 no'lu ara kestirimler). RWGH algoritması her ara kestirimi kendi kalanına ters olarak ağırlıklandırmaktadır. Ancak, düşük kaliteli ara kestirimlerin yüksek kalite düzeyinde ara kestirimlere göre sayıca daha fazla olması nihai konum kestiriminin de daha yüksek hassasiyet ile yapılmasına engel olmaktadır. RWGH algoritması açısından bütün bunlardan çıkan net sonuç, daha fazla sayıda RN kullanılmasının daha hassas lokalizasyon sonuçları vermeyebileceği, ara kestirimlerin genel kalitesinin de nihai sonuç hesaplanması öncesinde dikkate alınması ve gerekirse düşük kaliteli ara kestirimlerin nihai konum kestirimine dahil edilmemesinin iyi bir strateji olacaktır.



**Şekil 15.** Senaryo 1 için RWGH ara kestirim ortalama kalan değerleri



**Şekil 16.** Senaryo 3 için RWGH ara kestirim ortalama kalan değerleri

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında mobil robotların ulaşma zamanı metodu kullanılarak kablosuz lokalizasyonu problemi ele alınmıştır. Robotun referans noktalarına göre hareketi sonucu kanal koşulları dinamik olarak değişecek ve bu da ulaşma zamanı temelli mesafe ölçümlerinin değişken ölçülerde hatalı olmalarına sebep olacaktır. Bu dinamik kanal yapısı dikkate alınarak lokalizasyon için kullanılan iki algoritmanın (LS ve RWGH algoritmaları) performansları farklı senaryolar ışığında incelenmiştir. Her iki algoritmanın performansını iyileştirmek amacıyla bir hata kestirim metodu ortaya konmuş, bununla algoritmalar tarafından işlenen mesafe ölçümlerindeki hataların azaltılması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar hata kestirim metodunun başarılı olduğunu göstermektedir. Nitekim her iki lokalizasyon algoritmasında da hata kestirimi öncesi ve sonrasındaki performans değerleri (ARMSE) incelendiğinde belli bir iyileşme meydana geldiği görülmektedir. LS algoritması için bu iyileşme yaklaşık %5, RWGH algoritması için ise sistem senaryosuna bağlı olarak yaklaşık %10 - %17 oranındadır. Söz konusu sonuçlar mobil robot lokalizasyonu probleminin net çözümüne ışık tutacak niteliktedir.

## TEŞEKKÜR

M. KANAAN, Z.A. KUŞ

Çalışmalar kapsamındaki desteklerinden dolayı Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümüne ve bilhassa bölüm başkanı Prof. Dr. Şahin YILDIRIM'a, çalışmaya ilişkin yapıcı değerlendirmeleri ve zamanları için hakemlere teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- [1] ALBERT, F.Y.C., MASON, C.H.S., KIING, C.K.J., EE K.S., CHAN, K.W., “Remotely Operated Solar-powered Mobile Metal Detector Robot”, *Procedia Computer Science*, 42, 232-239, 2014.
- [2] PALACÍN, J., SALSE, J.A., VALGAÑÓN, I., CLUA, X., “Building a Mobile Robot for a Floor-Cleaning Operation in Domestic Environments”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53, 1418-1424, 2004.
- [3] YAKOUBI, M.A., LASKRI, M.T., “The Path Planning of Cleaner Robot for Coverage Region Using Genetic Algorithms”, *Journal of Innovation in Digital Ecosystems*, 3, 37-43, 2016.
- [4] FORLIZZI, J., DISALVO C., “Service Robots in the Domestic Environment: A Study of the Roomba Vacuum in the Home”, *Proceedings of the 1<sup>st</sup> ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction*. 258-265. Salt Lake City, USA, 2006.
- [5] EMKEN, J.L., WYNNE, J.H., HARKEMA, S.J., REINKENSMEYER, D.J., “A Robotic Device for Manipulating Human Stepping”, *IEEE Transactions on Robotics*, 22,185-189, 2006.
- [6] KANEKO, S., CAPI, G., “Human-Robot Communication for Surveillance of Elderly People in Remote Distance”, *IERI Procedia*, 10, 92-97, 2014.
- [7] CHIVAROV, N., SHIVAROV, N., “Remote Control User Interfaces for Service Mobile Robots for Elderly Care”, *IFAC-PapersOnLine*, 49, 73-76, 2016.
- [8] CHIVAROV, N., CHIKURTEV, D., YOVCHEV, K., SHIVAROV, S., “Cost-Oriented Mobile Robot Assistant for Disabled Care”, *IFAC-PapersOnLine*, 48, 128-133, 2015.
- [9] PIGNOLO, L., “Robotics in Neuro-Rehabilitation”, *Journal of Rehabilitation Medicine*, 41, 955-960, 2009.
- [10] SUMIYA, T., MATSUBARA, Y., NAKANO, M., SUGAYA, M., “A Mobile Robot for Fall Detection for Elderly-Care”, *Procedia Computer Science*, 60, 870-880, 2015.
- [11] MOHAMED, Z., CAPI, G., “Development of a New Mobile Humanoid Robot for Assisting Elderly People”, *Procedia Engineering*, 41, 345-351, 2012.
- [12] ROSSETTI, M.D., KUMAR, A., FELDER, R.A., “Mobile Robot Simulation of Clinical Laboratory Deliveries”, *Proceedings of the 30<sup>th</sup> Conference on Winter Simulation*, 1415-1422. Washington, DC, USA, 2000.
- [13] ZHANG, X., GAO, H., GUO, M., LI, G., LIU, Y., LI, D., “A Study on Key Technologies of Unmanned Driving”, *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 1, 4-13, 2016.
- [14] GRUDIC, G.Z., LAWRENCE, P.D., “A Nonparametric Learning Approach to Vision based Mobile Robot Localization”, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference*, 724-729. Victoria, BC, Canada, 1998.
- [15] LEE, S., SONG, J.-B., “Mobile Robot Localization using Optical Flow Sensors”, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2, 485-493, 2004.
- [16] HATİPOĞLU, K.H., Genişletilmiş Kalman Süzgeci ile Gezgin Robot Konumunun Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2007.
- [17] ROUMELIOTIS, S., BEKEY, G.A., “Bayesian Estimation and Kalman Filtering: A Unified Framework for Mobile Robot Localization”, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2985-2992. San Francisco, USA, 2000.
- [18] LIN, H.-H., TSAI, C.-C., HSU, J.-C., “Ultrasonic Localization and Pose Tracking of an Autonomous Mobile Robot via Fuzzy Adaptive Extended Information Filtering”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57, 2024-2034, 2008.
- [19] METREAUD, L.T., An RF-Isolated Real-Time Multipath Testbed for Performance Analysis of WLANs, Yüksek Lisans Tezi, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA, 2006.
- [20] HEIDARI, M., Identification and Modeling of the Dynamic Behavior of The Direct Path Component in ToA-Based Indoor Localization Systems, Doktora Tezi, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA, 2008.
- [21] ALAVI, B., PAHLAVAN, K., “Modeling of the TOA-based Distance Measurement Error Using UWB Indoor Radio Measurements”, *IEEE Communications Letters*, 10, 275-277, 2006.
- [22] NERGUIZIAN, C., DESPINS, C., AFFÈS, S., “A Framework for Indoor Geolocation Using and Intelligent System”, *Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on WLANs*, 1-5. Boston, USA, 2001.
- [23] ALAVI, B., Distance Measurement Error Modeling for Time-of-Arrival Based Indoor Geolocation, Doktora Tezi, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA, 2006.

*MOBİL ROBOTLARIN BİNA İÇİ KOŞULLARDA ULAŞMA ZAMANI KULLANILARAK KABLOSUZ LOKALİZASYONU*

- [24] KANAAN, M., PAHLAVAN, K., “Algorithm For TOA-Based Indoor Geolocation”, IEE Electronics Letters, 40, 1421-1422, 2004.
- [25] BAHL, P., PADMANABDAN, V.N., “RADAR: An In-building RF-based User Location and Tracking System”, Proceedings of the Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 775-784. Tel Aviv, Israel, 2000.
- [26] KANAAN, M., Node Density and Quality of Estimation for Infrastructure-based Indoor Geolocation Using Time of Arrival, Doktora Tezi, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA, 2008.
- [27] SAYED, A.H., TARIGHAT, A., KHAJEHNOURI, N., “Network-based Wireless Location: Challenges Faced in Developing Techniques for Accurate Wireless Location Information”, IEEE Signal Processing Magazine, 22, 24-40, 2005.
- [28] ALSINDI, N., Indoor Cooperative Localization for Ultra Wideband Wireless Sensor Networks, Doktora Tezi, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA, 2008.
- [29] KANAAN, M., PAHLAVAN, K., “A Comparison of Wireless Geolocation Algorithms in the Indoor Environment”, Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 177-182. Atlanta, USA, 2004.
- [30] DAVIDON, W.C., “Variance Algorithm for Minimization”, Computer Journal, 10, 406-410, 1968.
- [31] CHEN, P.C., Mobile Position Location Estimation in Cellular Systems, Doktora Tezi, Rutgers University, New Jersey, USA, 1999.
- [32] CHEN, P.C., “A Non-Line-of-Sight Error Mitigation Algorithm in Location Estimation”, Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 316-320. New Orleans, USA, 1999.
- [33] VAN TREES, H.L., Detection, Estimation and Modulation Theory Part I, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 2001.
- [34] KUŞ, Z.A., Mobil Robotların Bina İçi Koşullarda Ulaşma Zamanı Kullanılarak Kablosuz Konumlandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, 2013.
- [35] AMIOT, N., PEDERSEN, T., LAARAIEDH, M., UGUEN, B., “A Hybrid Positioning Method Based on Hypothesis Testing”, IEEE Wireless Communications Letters, 1, 348-351, 2012.
- [36] SOLTANMOHAMMADI, E., OROOJI, M., NARAGHI-POUR, M., “Decentralized Hypothesis Testing in Wireless Sensor Networks in the Presence of Misbehaving Nodes”, IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 8, 205-215, 2013.
- [37] IYENGAR, S.G., NIU, R., VARSHNEY, P.K., “Fusing Dependent Decisions for Hypothesis Testing with Heterogeneous Sensors”, IEEE Transactions on Signal Processing, 60, 4888-4897, 2012.
- [38] <https://www.mathworks.com/help/stats/coefficient-of-determination-r-squared.html> (erişim tarihi: 24.08.2017).