

## Geniş bant konum belirleme sistemi performans analizi ve iyileştirilmesi

Kerem Küçük<sup>1\*</sup>

13.07.2016 Geliş/Received, 28.10.2016 Kabul/Accepted

doi: 10.16984/saufenbilder.64863

### ÖZ

Geniş bant spektrumu ve yüksek çözünürlük özellikleri ile çok geniş bant (Ultra-Wide Band, UWB) teknolojisi, birçok kapalı alan konum belirleme probleminde tercih edilmektedir. Bu çalışmada; UWB kablosuz sinyallerini kullanan konum belirleme sisteminin konum belirleme performansının belirlenmesi ve genellikle açık alan konum belirlemede kullanılan yatay hassaslık ölçeğinin (Horizontal Dilution Precision, HDOP) kapalı alanda bu sistem için kullanılmasıyla, konum tahmin hatasının iyileştirilmesi için yeni bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntem kullanışsız olan konum tahmin noktalarının elenmesi temel almaktadır ve UWB konum belirleme sistemi ile elde edilen deneysel konum belirleme sonuçlarının iyileştirilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemin performans analizi için UWB sisteminin sağladığı konum verilerine literatürde kullanılan en küçük kareler (Least Squares, LS) ve doğrusal olmayan regresyon (Non-Linear Regression, NLR) ve önerilen HDOP tekniklerinin uygulanması ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır. Sonuçlar göstermektedir ki; önerilen HDOP tekniği, LS algoritmasının ortalama konum hatasına göre yaklaşık olarak %9 oranında, NLR algoritmasına göre ise %5 oranında daha iyi sonuç vermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Çok geniş bant, Bina içi konum belirleme, Yatay hassaslık ölçeği

## Performance analysis and improvement of the ultra-wide band localization system

### ABSTRACT

With the very wide spectrum and high resolution characteristics, ultra-wideband (UWB) communication technique is chosen various indoor localization. This paper presents the localization performance of a positioning system, which uses UWB wireless signals, and a novel method to decrease the localization error using horizontal dilution of precision (HDOP), which uses for outdoor positioning in the literature, for this system. This method focuses to eliminate the unadaptable localization points and provides elimination of UWB experimental localization results. The comparison between the proposed method localizations and the results by elimination of UWB system raw localization data with the least-squares (LS) and the non-linear regression (NLR) techniques are provided for the performance analysis. As the results, the proposed HDOP technique approximately provides 9% the better performance than the LS algorithm. In addition, the technique also provides 5% the better performance than the NLR algorithm.

**Keywords:** Ultra-wide band, Indoor localization, Horizontal dilution of precision

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Kocaeli - kkucuk@kocaeli.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kablosuz haberleşme sistemleri birçok başarılı uygulama ile günümüz iletişim problemlerine kolaylıkla uygulanabilen çözümler sunmaktadır [1]. Bu sistemlerin sunduğu uygulanabilir çözüm yöntemleri sayesinde araştırmacılar son yıllarda çalışmalarını konum tahmini ve gerçek zamanlı kullanıcı takibi problemlerine yoğunlaştırmaktadırlar. Literatürde kullanıcının konumunu tahmin eden ve gerektiğinde takip edebilen farklı ortamlar için çalışmalar mevcuttur [2]. Açık alanlar için sunulan çözümlerden en önemlisi olarak küresel konumlandırma sistemi (Global Positioning System, GPS) [3] kabul edilmesine rağmen, kapalı alanlar için ortak bir kabul gören teknik henüz gerçekleştirilememiştir. Bu alandaki çalışmalar sinyal çözünürlüğü geleneksel radyo teknolojisine göre çok daha iyi olan çok geniş bant (Ultra-Wide Band, UWB) teknolojisi üzerinde yoğunlaşmaktadır [4]. UWB teknolojisini kullanan radyo alıcı vericileri, yüksek bant genişliği ile çoklu yol parazitlerin etkisini azaltarak veriyi daha küçük hata ve yüksek hızlarda iletebilmektedirler. Böylelikle kapalı alanlarda cihazlar arasında güvenli bir kablosuz haberleşme ortamı oluşmaktadır [5].

UWB sistemleri aynı frekans spektrumunda çalışan sistemlerin neden olacağı parazitlerden etkilenmemesi için belirli güç seviyelerinde iletim yapmaktadırlar. Böylelikle kablosuz UWB sinyalleri, özellikle konum belirleme için söz konusu olabilen engellerin içine işleme, kesin konum tahmini, yüksek hızda veri iletimi, düşük maliyetli ve düşük güçlü alıcı-verici tasarımı gibi avantajlar sağlamaktadırlar. Literatürde, UWB haberleşme tekniğini farklı biçimlerde kullanan çok fazla sayıda konum belirleme tekniği mevcuttur [6]. Kapalı alanlar için önerilen teknikler ise radyo sinyalinin parmak izi ve uzaklık tabanlı çözümler olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Uzaklık tabanlı konum tahmini yapabilmek için temel yöntem sinyal parametreleri ölçümlerine dayanan nicelikler kümesinin gerçek zamanlı olarak doğrudan çözülmesini öngören geometrik tekniklerdir [6]. Bu nicelikler farklı geometrik şekillerin kesişim kümelerinin bulunmasını sağlayan geometrik modellerden türetilmiştir. Geliş zamanı (Time Of Arrival, TOA) veya alınan sinyal gücü (Received Signal Strength, RSS) ölçümü hedefin pozisyonu için bir daire tanımlayan alıcı ile hedef arasındaki uzaklığın belirlenmesini sağlar. Bu şekilde alıcı ile hedef arasında gerçekleştirilen geliş açısı (Angle of Arrival, AOA) veya geliş zamanı farkı (Time Difference of Arrival, TDOA) ölçümü ile yine hedefin konumu belirlenebilmektedir [7], [8], [9]. Kapalı alanlarda uzaklık tabanlı konum belirleme performansını alıcıların konumu [10], yapılan ölçümün niteliği ve sayısı [11] gibi etkenler değiştirmektedir. Chai ve diğerleri kapalı alanda UWB alıcılarının konumlandırılması ve konumları bilinmeyen

farklı sayıda düğümlerin bağlantılarını kullanan işbirlikçi konum belirleme algoritması önermişlerdir [12]. Bununla birlikte kapalı alanlardaki konum belirleme ihtiyacının uygulamaya yönelik artışı UWB çalışmalarını konum hassasiyetinin artırılmasına yöneltmektedir [13]. Ticari olarak alınabilen bir UWB sistemi ile gerçek zamanlı 3 boyutlu bir konum belirleme sisteminin sunulduğu çalışmada konum verilerinin iyileştirilmesi için triletasyon ve üç izleme filtresi kullanılmıştır [14]. Bununla birlikte GPS için kullanılan GDOP metriğinin kapalı alanlarda da kullanılarak konum belirleme yapılmasına yönelik çalışmalar da mevcuttur [15], [16]. Kapalı alanlarda bu konum belirleme sistemleri için optimizasyon ve istatistiksel yaklaşım teknikleri de çalışılmaktadır [5]. Bu teknikler gürültülü ölçümlerin kullanıldığı parametreler ile elde edilen fazla sayıdaki pozisyon bilgisi ile konum tahmini için teorik çözümler ortaya koyabilmektedirler. Ticari olarak üretilmiş UWB konum belirleme sistemleri günümüzde birçok sağlık, güvenlik, askeri ve acil durum uygulamalarında kullanılabilir [17], [18]. Uygulamalara göre değişen konumlandırma hedeflerinde genelde bir metrenin altında hata beklenmektedir. Bu hedefi doğrultusunda UWB sisteminin kullanacak olduğu konum belirleme tekniği kesinlik, karmaşıklık, kararlılık, ölçeklenebilirlik ve maliyet değerlendirilmesine göre seçilmektedir. Çalışmalara göre UWB konum belirleme ürünleri son gelişmeler ile birlikte yüksek kesinlikte konum belirleme sağlayabilmektedirler [17], [19].

Bu çalışmada, ticari olarak üretilmiş olan bir UWB konum belirleme sisteminin laboratuvar ortamına kurulması ve bu ortam için konum belirleme performansının değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bununla beraber, konum belirleme sisteminden elde edilen deneysel konum tahminlerinin, GPS sisteminde açık alanlar için kullanılan yatay hassaslık ölçeği (Horizontal Dilution of Precision, HDOP) [20] ile iyileştirilmesini sağlayan yeni bir yöntem önerilmektedir. Bu amaçla HDOP için eşik değer tanımlaması yapılarak, bir filtre gibi kullanılması sunulmaktadır. Bu yöntemin mevcut teorik çalışmalara göre en önemli avantajı her hangi ek ölçüm parametresine ihtiyaç duymadan, mevcut ölçümlerin kaliteli olanlarının konum tahmini sürecine dâhil edilmesidir. Ayrıca yöntemin birden fazla alıcı içeren tüm UWB sistemleri için uygulanabilir olması diğer bir avantajıdır. Bu tekniğin kullanılabilmesi için ölçümlerin yapılacak olduğu alanın farklı alıcı sayılarına göre HDOP haritalarının çıkarılması gerekmektedir. Literatürde, önerilen HDOP tekniği ile benzer amaçla kullanılan en küçük kareler (Least square, LS) [21] ve doğrusal olmayan regresyon (Non-Linear Regression, NLR) [22] mevcuttur. Bu algoritmalar yüksek hesaplama karmaşıklığına sahiptirler. UWB tekniği kullanan konum belirleme sisteminin ayrıntılı açıklaması ve konumları

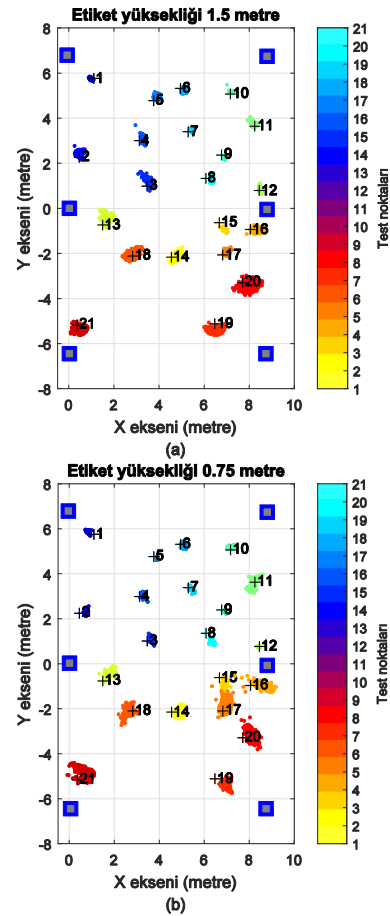
bilinen statik test noktaları için deneysel sonuçların elde edilmesi ve değerlendirilmesi Bölüm 2’de sunulmaktadır. UWB sisteminin sağladığı tahminlerin iyileştirilmesi için kullanılacak olan HDOP yöntemi, LS ve NLR algoritmaları Bölüm 3’te anlatılmaktadır. Önerilen tekniğin literatürde konum belirleme tekniklerinin iyileştirilmesi için kullanılan LS ve NLR algoritmaları ile karşılaştırılmasını kapsayan ayrıntılı konum belirleme performansları Bölüm 4’te sunulmaktadır. Son olarak Bölüm 5’te tartışma ve sonuçlar verilmektedir.

## 2. UWB KONUM BELİRLEME SİSTEMİ (UWB LOCALIZATION SYSTEM)

Genel bir UWB konum belirleme sisteminde tipik olarak etiket (tag) olarak adlandırılan; kontrol altında tetiklendiğinde UWB sinyallerini yayan bir verici ve UWB sinyallerini alan birden fazla alıcı vardır. Bu sistemler hem statik ölçümleri hem de hareketli ölçümleri gerçekleştirebilmektedir. Piyasada farklı firmaların farklı problemlere yönelik konum belirleme sistemleri mevcuttur [6]. Bu çalışmada kullanılan UWB konum belirleme sistemi, geleneksel tek yönlü zaman bölüşümlü çoklu erişim kontrol kanalı kullanan bir konum belirleme platformudur ve konumlama işlemi için AOA ve TDOA sinyal parametrelerini kullanmaktadır. 6-8.5 GHz frekans bandında çalışan alıcılar bina içinde sabit ve ölçüm yapılacak alana göre yüksek noktalara yerleştirilmiştir. Geleneksel radyo frekans (RF) sinyalinde, bina içerisinde kesin sinyal zamanlaması yapmak zordur. Ancak UWB sinyalleri ile direk yol, yansımalarından ayrılabilirdiği için kesin sinyal zamanlaması yapmak mümkündür. Konumları üç boyutlu olarak tespit edilmiş olan alıcılar, veri kabloları ile merkezi bir bilgisayarında bulunduğu aynı ağa bağlanmışlardır. Bu bilgisayar UWB konum belirleme sisteminin etiket ve alıcılardan sonraki üçüncü bileşeni olan konum belirleme yazılımını içermektedir. Bu yazılım tüm sistemin kurulumu, kalibrasyonu ve kullandığı algoritmalar ile alıcı ölçümlerinden konum tahminlerinin bulunmasını sağlamaktadır. Sistem konum tahmininde her bir alıcı etiket için bir AOA vektörü ve TDOA eğrisini oluşturur. Bu doğru ve eğrinin kesişim noktası etiketin konumunu vermektedir. Tüm alıcıların eş zamanlı çalışabilmeleri ve daha kesin konum belirleme performansı için yapılan kalibrasyonda alıcıların üç boyutlu koordinat sisteminde nereye yerleştiğinin tespiti ve aynı ağa bağlı olan bilgisayarda bulunan yazılıma bu koordinatların biçimde girilmesi gerçekleştirilmiştir.

UWB konum belirleme sistemi 159 m boyutlarındaki laboratuvar ortamında, Şekil 1’de görüldüğü gibi toplam 6 adet alıcıya sahiptir. Alıcıların tamamı yaklaşık olarak 2.30 m yüksekliğindeki sütunların üzerine gerekli kalibrasyon işlemleri yapılarak konumlandırılmışlardır. Bu alıcıların 4 tanesi laboratuvarda birbirlerini görecek

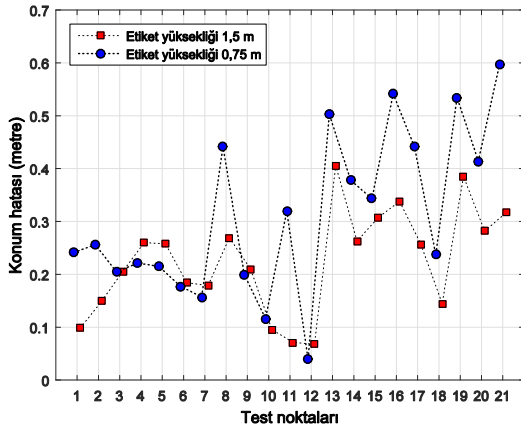
biçimde diğerleri ise koridora yerleştirilmişlerdir. Toplam 21 tane statik ölçüm noktası rasgele belirlenmiştir. Ölçümlerde etiket 0.75 m ve 1.5 m yüksekliğinde üç ayaklı sehpaaya sabitlenerek konum belirlemesi yapılmıştır. Bu aşamada her bir nokta üzerinde yaklaşık olarak 2.5 dakika beklenerek bir diğer ölçüm noktasına geçilmiştir. Şekil 1’de UWB konum belirleme sisteminin farklı yükseklikteki iki etiket için alıcılardan sağlanan ölçümler ile her bir ölçüm noktası için tespit ettiği tahmin noktaları gösterilmektedir. Etiket yüksekliğinin 1.5 m olduğu konum belirleme tahminlerine bakıldığında birbirini gören alıcıların bulunduğu laboratuvardaki test noktalarındaki hatanın koridorlardaki noktalara göre çok daha küçük olduğu görülmektedir. Etiket yüksekliğinin 0.75 m olduğu ölçümlere bakıldığında da benzer konum tahmin sonuçları görülmektedir. Bu konum belirleme hatasının bu noktalar için fazlalığı koridorlardaki zayıflatıcı etkinin fazla olmasıdır.



Şekil 1. UWB konum belirleme sisteminin farklı yüksekliklerdeki etiketler için tahmin noktaları (The estimated positions of the tags at distinct pitch for the UWB localization system)

UWB konum belirleme sisteminin elde etmiş olduğu verilerden elde edilen konum hatalarının her iki etiket yüksekliği içinde ortalama hataları Şekil 2’de

gösterilmektedir. Ortalama hatalara bakıldığında etiket yüksekliğinin 1.5 m olduğu sonuçlar diğer etiket sonuçlarına göre genel olarak daha iyi sonuçlar vermektedir. Sonuçlara göre ortalama konum hatalarının tamamı her iki etiket yüksekliği için de genel olarak 0.6 m'nin altında kaldığı görülmektedir. Tüm konum tahminlerinin ve test noktalarının ortalamalarında 0.75 m ve 1.5 m etiket yükseklikleri için sırasıyla 0.32 m ve 0.23 m konum hatası elde edilmiştir.



Şekil 2. UWB konum belirleme sisteminin ortalama konum hataları (The mean position errors of the UWB localization system)

### 3. KULLANILAN YÖNTEMLER (METHODS)

UWB konum belirleme sisteminin sağladığı konum verilerinin iyileştirmesi için önerilen yatay hassaslık ölçeğinin kullanımı ile daha fazla alıcıdan elde edilen konum verilerin tespiti yapılabilmektedir. Daha fazla alıcı ile elde edilmiş konum verisi daha iyi yatay hassasiyete sahiptir. Yatay hassasiyetin iyileşmesi elde edilecek konum verilerinin de iyileşmesi anlamına gelmektedir [20]. Literatürde var olan ve konum verilerinin iyileştirilmesi için de kullanılan LS ve NLR teknikleri ise iteratif işlemler dizisi ile konum verilerinin iyileştirilmesini gerçekleştirmektedirler. Bu yöntemler bu bölümde anlatılmaktadır.

#### 3.1. En Küçük Kareler Yöntemi (Least Mean Squares Method)

En küçük kareler (Least Square, LS) yöntemi, konumu tespit edilmeye çalışılan bir hedefin sistemde kullanılan alıcılara olan uzaklıklarının bir denklem sistemi içerisinde yerleştirilerek, hatanın iyileştirilmesi için kullanılan geleneksel çözüm yöntemlerinde birisidir. Bu yöntem sonsuz uzayların kesiştiğini göz önüne almaktadır. Bu uzayların kesişim noktası en küçük kareler yöntemi ile tespit edilebilmektedir. Bu tanımlamadan yola çıkılarak, alıcı konumlarının  $(x_i, y_i, z_i)$  ve  $(x_j, y_j, z_j)$  noktaları ve hedef noktanın bu alıcılara olan uzaklıklarının  $(d_i, d_j)$

olduğu varsayıldığında; hedefin konumu için Denklem (1) yazılır.

$$\begin{aligned}(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 &= d_i^2 \\ (x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2 &= d_j^2\end{aligned}\quad (1)$$

Denklem (1)'in varlığında kesişen uzaylar arasındaki fark Denklem (2) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}2(x_j - x_i)x + 2(y_j - y_i)y + 2(z_j - z_i)z \\ = d_i^2 - d_j^2 - x_i^2 - y_i^2 - z_i^2 + x_j^2 \\ + y_j^2 + z_j^2\end{aligned}\quad (2)$$

Denklem (2)'nin sürekli ve doğrusal formu Denklem (3) ile gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}\mathbf{R}\mathbf{p} = \mathbf{O} \Rightarrow \mathbf{p} = [\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{z}], \\ \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 2(x_0 - x_1) & 2(y_0 - y_1) & 2(z_0 - z_1) \\ 2(x_0 - x_2) & 2(y_0 - y_1) & 2(z_0 - z_1) \\ 2(x_0 - x_3) & 2(y_0 - y_1) & 2(z_0 - z_1) \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (3)$$

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_0^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \\ d_2^2 - d_0^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \\ d_3^2 - d_0^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \end{bmatrix}$$

Denklem (3)'teki eşitlikler kullanılarak hedef nokta için üç boyutlu konum tespiti Denklem (4) ile ifade edilir. Denklem (4)  $\mathbf{R}$  matrisinin uygun Rank değerine sahip olması durumunda tahmin edilecek konum için üç boyutlu konum bilgisi sağlanmaktadır.

$$\mathbf{p} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{O}\quad (4)$$

#### 3.2. Doğrusal Olmayan Regresyon Yöntemi (Non-Linear Regression Method)

Bu yöntem, lineer olmayan bir veya daha fazla sayıda bilinmeyen parametreye dayanan bir tahmin eşitliği ile karakterize edilmektedir. Kalıntı (*Residual*) hataların karelerinin toplamını minimize etmesi sebebiyle; tahmin edilen uzaklıkların kolaylıkla kullanıldığı bu teknik, konum belirleme için çoğu zaman uygun çözümler sunabilmektedir. Doğrusal olmayan regresyonun bir kez uygulanması ile tüm ölçümlere dayanan bir konum tahmini gerçekleştirilir. Alıcının pozisyonu  $(u, v, w)$ , etiketin pozisyonu  $(x_i, y_i, z_i)$  varsayıldığında; alıcı ile etiket pozisyonu arasında yapılacak ölçümde mutlaka bir ölçüm hatası olmaktadır. Bu iki nokta arasındaki ölçüm hatasını içeren uzaklık Denklem (5) ile gösterilmiştir.

$$r_i = \sqrt{(x_i - u)^2 + (y_i - v)^2 + (z_i - w)^2} + \varepsilon_i \quad (5)$$

Denklem (5)'te  $\varepsilon_i$ , ölçüm hatasını temsil etmektedir. Ayrıca tahmin edilen noktanın alıcıya olan uzaklığı da Denklem (6) ile verilmiştir.

$$d_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 + (z_i - \hat{z}_i)^2} \quad (6)$$

Denklem (5) ve (6) ile konum tahmini Denklem (7)'de verilen standart kalıntı hatasının belirlenmesiyle elde edilir.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_i^N (r_i - d_i)^2 \quad (7)$$

Denklem (7)'de  $r_i$  noktanın alıcı ile arasındaki ölçüm hatasını da içeren uzaklığını,  $d_i$  tahmin edilen noktanın alıcıya olan uzaklığı ve  $N$  bu nokta için kullanılan tahmin sayısını temsil etmektedir. Elde edilen kalıntı hatasının üstünde kalan ölçümler dışındaki diğer ölçümler hedef konum tahminleri olarak kullanılmaktadırlar.

### 3.3. Yatay Hassaslık Ölçeği Yöntemi (Horizontal Dilution of Precision Method)

Küresel konumlama sistemi sağlamış olduğu avantajlar sebebiyle; kablosuz haberleşme alanında birçok çalışmaya konu olmuştur. Kesin bir konumlama işlemi için bu sistemin o anki uydu geometrisinin konum belirlemeye uygun olup olmadığına karar vermesi gerekmektedir. Bu kararın verilebilmesi için çalışmalar genellikle hassaslık ölçeğini (Dilution of Precision, DOP) kullanılmaktadırlar. Bu ölçeğe göre yapılacak olan konum belirleme işleminin güvenilirlik seviyesi belirlenmiş olacaktır. Hesaplanan DOP değerinin yüksek çıkması uydu geometrisinin iyi olmadığı, düşük çıkması ise uydu geometrisinin uygun olmadığı anlamına gelmektedir. DOP ölçeği farklı türler ile ifade edilebilmektedir. Bunlardan biri de yatay hassaslık ölçeğidir (HDOP). HDOP ölçeği yatay düzlemde gerçekleştirilen konumlama işlemlerinde kullanılır ve matematiksel olarak uyduların geometrilerinden hesaplanabilmektedir. HDOP değerinin matematiksel olarak hesaplanmasında uyduların bilinen üç boyutlu konumları kullanılarak, konumu tahmin edilen alıcının her bir uyduya olan uzaklıkları tespit edilir ve Denklem (8) ile hesaplanır.

$$R_i = \sqrt{(x_i - R_x)^2 + (y_i - R_y)^2 + (z_i - R_z)^2} \quad (8)$$

Burada  $R_i$  tahmin edilen nokta ile uydu arasındaki uzaklığı göstermektedir.  $R_x$ ,  $R_y$  ve  $R_z$  konumu tahmin

edilen alıcının üç boyutlu konum bilgilerini,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  terimleri ise uyduların konum bilgilerini temsil etmektedir. Bu uzaklık bilgileri ile beraber Denklem (9) ile verilen formüller kullanılarak her bir uydu için yönlü türevler alınır.

$$\begin{aligned} Dx_i &= \frac{x_i - R_x}{R_i}, Dy_i = \frac{y_i - R_y}{R_i}, \\ Dz_i &= \frac{z_i - R_z}{R_i}, Dt_i = -1 \end{aligned} \quad (9)$$

Burada  $D_i$  uyduların zamanları ile ilgili işlem yapılacağıda kullanılabilir (Time DOP, TDOP). Alıcının konum tahmininin doğrulanması için elde edilen bu veriler tüm uydular için sırasıyla bir matrise ( $G$ ) yerleştirilir. Elde edilen bu matrisin kovaryansı kullanılarak DOP hesaplamaları gerçekleştirilir. DOP hesaplamaları Denklem (10) ile gösterilmektedir.

$$(G^T G)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zt}^2 \\ \sigma_{tx}^2 & \sigma_{ty}^2 & \sigma_{tz}^2 & \sigma_{tt}^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Bu matrisin köşegen elemanları, her bir eksen ve kullanıcı zamanı için tahmin edilen kullanıcı pozisyonunun varyansını temsil etmektedir. Elde edilen matrisin elemanları kullanılarak HDOP değeri Denklem (11) ile tespit edilmektedir.

$$HDOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2} \quad (11)$$

HDOP ölçeğinin matematiksel olarak hesaplanmasından sonra, bu ölçeğin konum tahminlerinin uygun olup olmadığına karar vermesi için bir seviye tespiti yapılması gerekmektedir. Bunun için algılayıcı alanın tamamına bir HDOP analizi yapılması gerekmektedir. Bu analizin sonucunda Denklem (12) ile verilen matematiksel ifade ile bir HDOP eşik seviyesi ( $HDOP_L$ ) tespit edilebilmektedir.

$$\mu_{HDOP_B} + \sigma_{HDOP_B} \leq HDOP_L \leq \mu_{HDOP_W} + \sigma_{HDOP_W} \quad (12)$$

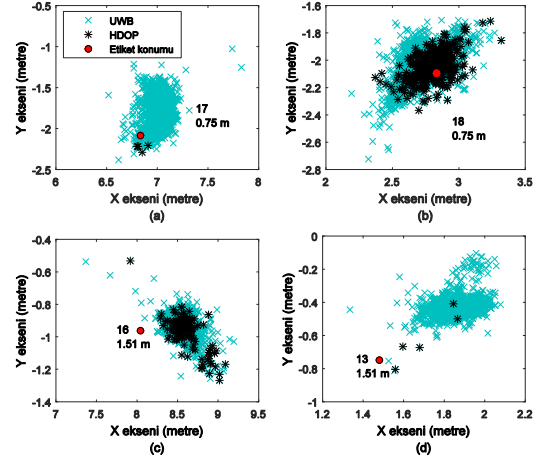
Burada  $\mu_{HDOP_B}$  ve  $\mu_{HDOP_W}$  sırasıyla uydu geometrisinin en iyi ve en kötü olduğu durumlarda tüm alan için yapılacak HDOP hesabının ortalamalarını,  $\sigma_{HDOP_B}$  ve  $\sigma_{HDOP_W}$  ise standart sapmalarını temsil etmektedir. Bu önerilen yöntemin kapalı alanda çalışan UWB konum tahmin sistemine uygulanması ile altı alıcının yaptığı ölçümlerin kalitelerinin belirlenmesi ve kalitesiz ölçümlerin elenmesi ile gerçekleştirilmektedir.

#### 4. KONUM BELİRLEME SONUÇLARI (LOCALIZATION RESULTS)

UWB konum belirleme sistemi ile konum belirleme deneysel sonuçları iki farklı etiket yüksekliğinde 21 farklı test noktası için elde edilmiştir. Bu test noktalarının her biri için etiket yüksekliği 1.5 m olduğu durumda UWB konum belirleme sistemi test noktaları için 1500 ile 2200 konum tahmini gerçekleştirmiştir. Elde edilen bu tahmin sayıları yaklaşık olarak 100 ms'de bir okuma ile gerçekleştirilmiştir. Bu elde edilen tahminler konum belirleme algoritmalarının her birinde performans değerlendirilmesi için kullanılmıştır.

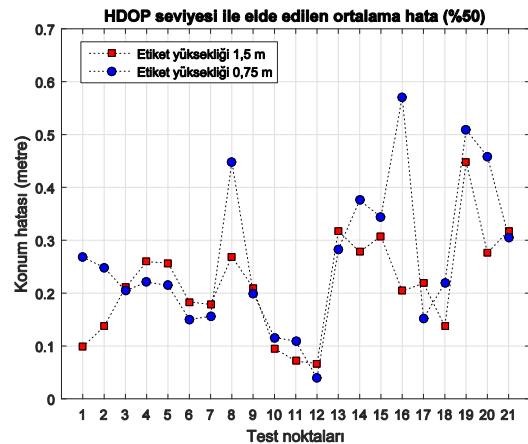
İlk olarak, deneysel sonuçların uygulandığı ve HDOP yöntemi olarak önerilen yöntem için laboratuvar ortamında farklı sayıda alıcılardan veri aldıkları durumda HDOP seviyelerinin tespiti gerçekleştirilmiştir. Buna göre alanın tamamında bütün alıcılardan veri alındığı durumdaki HDOP seviyelerini ile yalnızca üç alıcıdan veri alındığındaki HDOP seviyelerini göz önüne alınarak HDOP eşik değeri seçiminde gerçekleştirilmiştir. Tüm alıcılardan veri alındığı koşulda; bu değer 0.96 - 1 arasında tespit edilmiştir. Bu değer açık alanlarda konum belirlemede de ideal olarak nitelendirilmektedir. Yani tüm alıcılardan veri alındığında gerçekleştirilen konum belirleme işlemindeki alıcı geometrisinin en iyi olduğunu göstermektedir. Farklı kombinasyonlardaki üç değişik alıcıdan veri alındığı koşulda; bu değer 1.5 ile 5 arasında olduğu görülmüştür. Bu seviye kabul edilebilir seviyenin içerisinde olmakla beraber, alıcı geometrisinin her zaman için iyi olmadığı anlamına gelmektedir. Ancak HDOP seviyelerinin düşük olması alıcı geometrilerinin iyi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle UWB sisteminin deneysel sonuçlarının iyileştirilmesi aşamasında  $HDOP_L$  eşik seviyesi olarak çok iyi seviye olarak kabul edilen 1-2 aralığında 1.5 olarak seçilmiştir.

Şekil 3, test alanında gerçekleştirilen ölçümlerin HDOP değerine göre elimine edilmesi sonucunda kalan ölçümleri göstermektedir. Etiket yüksekliğinin 0.75 m olduğu sonuçlara göre Şekil 3(a)'da 17 numaralı test noktası için ölçümlerinin %99'u elimine edilerek, kalan tahminlerin ortalaması 0.15 m ile %64'lük bir iyileşme gerçekleşmiştir. Şekil 3(b)'de 18 numaralı noktanın test ölçümlerinin %51'ine yakını HDOP seviyesinin üstünde kalmaktadır. Bu ölçümlerin filtrenmesiyle, ortalama hatada %8'lik bir iyileşme elde edilmiştir. Etiket yüksekliğinin 1.5 m olduğu durumda test noktası 16 için, Şekil 3(c)'de 0.33 m olan ortalama hata 1570 test ölçümünden 1417'sinin elimine edilmesi ile 0.20 m tespit edilmiştir. Son olarak, Şekil 3(d)'de test noktası 13 için 1576 ölçümün 5 tanesi istenilen HDOP seviyesinin altında kalmıştır. Bu 5 ölçümün ortalama hatası ise 0.32 m olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3. Test noktalarının HDOP seviyesi ile filtrenmesi sonucunda kalan ölçümler (The rest measurements of test points by filtering with HDOP level)

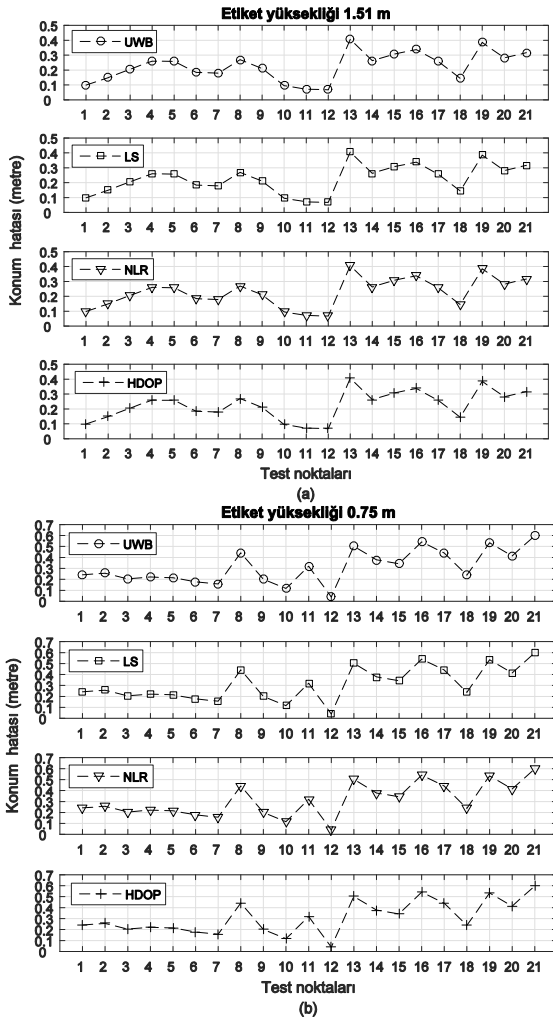
HDOP eşik seviyesinin kullanılarak yapılan filtreleme işlemi sonunda tüm test noktaları ve her iki etiket yüksekliği için elde edilen ortalama pozisyon hataları Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre etiket yüksekliği 0.75 m için yalnızca 16 ve 19 numaralı test noktaları hariç, diğer tüm test noktalarının ortalama konum hataları 0.5 m'nin altında kalmaktadır. Bu değer 1.5 m yüksekliğindeki etiket sonuçları için ise; 19 numaralı test noktası hariç 0.4 m olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar genel bir değerlendirme açısından işlenmemiş ölçümler ile kıyaslandığında; tüm test noktaları ve etiket yüksekliği 0.75 m için 0.3133 m olan ortalama konum hatası HDOP eşik seviyesi kullanıldığında 0.2664 m'ye gerilerken, 1.5 m etiket yüksekliğinde ise 0.2261 m iken 0.2159 m olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. Test alanındaki tüm noktaların HDOP seviyesi ile filtrenmesi sonucunda elde edilen ortalama konum hataları (The mean localization errors of all test points obtained by HDOP level)

Şekil 5'te deneysel ölçümlerin, önerilen HDOP tekniği ve diğer algoritmalar ile iyileştirilmesi sonucu elde edilen

ortalama hata performanslarının karşılaştırılması sunulmaktadır. Şekil 5(a) etiket yüksekliğinin 1.5 m olduğu sonuçlara göre, LS algoritmasının tüm test noktaları için konum tahmini gerçekleştirebildiği, 1 ve 7 numaralı test noktaları gibi bazı test noktaları için herhangi bir iyileştirme sağlayamadığı, 2 ve 8 gibi bazı test noktaları içinde performansın kötüleştiği görülmektedir. HDOP tekniği de tüm noktalar için konum tahmini gerçekleştirebilmektedir. Bununla birlikte HDOP tekniği de LS algoritması gibi bazı noktalar için daha iyi performans ortaya koyarken, bazı noktalar için UWB sistem ölçümlerinden daha yüksek hataya sahip tahminler gerçekleştirebilmektedir. NLR algoritmasının genel anlamda LS algoritmasına göre daha iyi gözüken konum tahmin performansı, HDOP tekniğine göre daha kötü olarak gerçekleşmiştir. Etiket yüksekliğinin 0.75 m olduğu Şekil 5(b)'deki sonuçlara göre; tüm teknikler 12 numaralı test noktası için yaklaşık olarak aynı performansta (0.039 m) bir tahmin ortalaması sağlamaktadırlar. Ortalama hatalara bakıldığında en iyi performansı HDOP tekniği sağlamaktadır.



Şekil 4. Test alanındaki tüm noktaların HDOP seviyesi ile filtrelenmesi sonucunda elde edilen ortalama konum hataları (The mean localization errors of all test points obtained by HDOP level)

Elde edilen tüm sonuçlar ve performans değerlendirmeleri sonucunda genel bir konum belirleme değerlendirmesi Tablo 1'de verilmektedir. Buna göre LS algoritması 0.75 m ve 1.5 m etiket yüksekliklerinde sırasıyla yaklaşık olarak %2.52 ve %0.32 oranında performans artırımını, %100'lük konum tahmini gerçekleştirme ile sağlamıştır. NLR algoritması ise tüm test noktaları için 0.75 m ve 1.5 m etiket yüksekliklerinde sırasıyla %9.32 ve %0.36 oranında performans artırımını sağlamıştır. Önerilen HDOP tekniği ise her iki algoritmaya göre daha iyi konum belirleme performansı sağlamaktadır.

Tablo 1. Tüm test noktaları ve etiket yükseklikleri için algoritmaların ortalama hatalarda sağlamış oldukları performans iyileştirmeleri oranları (The performance rate of the algorithms provide at mean position error)

	Konum tahmini iyileşme oranı	
	0.75 m	1.5 m
LS	%2.52	%0.32
NLR	%9.32	%0.36
HDOP	%14.97	%4.4

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, UWB konum belirleme sisteminin deneysel olarak bina içi konum belirleme performansının elde edilmesinin yanında; bu performansının HDOP yöntemi kullanılmasına dayanan bir iyileştirme tekniği sunulmaktadır. Ayrıca bu yöntem ile iki farklı etiket yüksekliğinde elde edilen konum tahminlerinin literatürde mevcut LS ve NLR tekniklerinin performans iyileştirmeleri karşılaştırılması olarak değerlendirilmektedir. UWB konum belirleme sistemi, kalibrasyon ve alıcıların oryantasyon problemlerinden dolayı; bazı test noktaları için konum belirleme sonuçları açısından sistemin genel performansına göre daha kötü sonuçlar verebilmektedir. HDOP ölçeğinin kullanılmasının önerildiği ve bunun için bir eşik seviye tespiti yapılabildiği konum belirleme tekniği ile UWB konum belirleme sisteminin elde ettiği konum tahminleri iyileştirildiğinde, tüm performans değerlendirilmesine göre yaklaşık olarak %7'lik bir performans iyileştirilmesi elde edilmektedir. Bunun dışında önerilen eşik seviye tespiti ile tüm test noktaları için, bu tekniğin konum tahmin performansı ortaya koyması garanti edildiği gösterilmiştir. Bununla birlikte gerçekleştirilen performans karşılaştırılmasında HDOP ölçeğinin kullanıldığı teknik literatürdeki mevcut LS ve NLR algoritmalarına göre her iki etiket yüksekliğinde de daha iyi sonuçlar vermektedir.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Y. Chen, S. Zhang, S Xu, G. Y. Li, "Fundamental Trade-offs on Green Wireless Networks," IEEE

- Communications Magazine, vol. 49, no. 6, pp. 30-37, 2011.
- [2] P. H. Tseng and K. T. Feng, "Hybrid Network/Satellite-Based Location Estimation and Tracking Systems for Wireless Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 9, pp. 5174-5189, 2009.
- [3] S. C. Yeh, W. H. Hsu, M. Y. Su, C. H. Chen, K. H. Liu, "A Study on Outdoor Positioning Technology using GPS and WiFi Networks," *Int. Conference on Networking, Sensing and Control, Japan*, 26-29 March 2009, pp. 597-601.
- [4] L. Huan and R. Bo, "Wireless location for indoor based on UWB," *34th Chinese Control Conference, Hangzhou*, 2015, pp. 6430-6433.
- [5] S. Gezici and H. Poor H, "Position Estimation via Ultra-Wide-Band Signals", *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 386-403, 2009.
- [6] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," *IEEE Tran. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, 2007.
- [7] D. Niculescu and B. Nath, "Ad Hoc Positioning System (APS) using AOA," *The IEEE 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, USA*, April 2003, vol. 3, pp. 1734-1743.
- [8] A. Catovic and Z. Sahinoglu, "The Cramer-Rao bounds of hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS location estimation schemes," *IEEE Communacitions Letter*, vol. 8, pp. 626-628, 2004.
- [9] T. Wang, X. Chen, N. Ge, Y. Pei, "Error analysis and experimental study on indoor UWB TDoA localization with reference tag," *2013 19th Asia-Pacific Conference on Communications, Denpasar*, 2013, pp. 505-508.
- [10] S. Monica and G. Ferrari, "UWB-based localization in large indoor scenarios: optimized placement of anchor nodes," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 51, no. 2, pp. 987-999, 2015.
- [11] X. Li and S. Yang, "The indoor real-time 3D localization algorithm using UWB," *International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Beijing*, 2015, pp. 337-342.
- [12] H. Cai, G. Wu, Y. Chen, L. Jiang, "Indoor collaborative localization method based on ultra-wideband ranging," *9th European Conference on Antennas and Propagation, Lisbon*, 2015, pp. 1-2.
- [13] G. Zhao and H. Niu, "Research and application of indoor positioning based on UWB," *Third International Conference on Cyberspace Technology, Beijing*, 2015, pp. 1-5.
- [14] D. Briese, H. Kunze, G. O. Rose, "High Precision UWB-Based 3D Localization for Medical Environment," *IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband, Montreal, QC*, 2015, pp. 1-5.
- [15] G. Feng, C. Shen, C. Long, F. Dong, "GDOP index in UWB indoor location system experiment", *IEEE Sensors, Busan*, 2015, pp. 1-4.
- [16] K. Kucuk, "Horizontal dilution of precision based ultra wide band positioning technique for indoor environments," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 22, pp. 1307-1322, 2014.
- [17] M. Baum, "RTL in Longueuil selects bus yard management solution provided by Solotech", *ISR Transit and Ubisense*, 2011.
- [18] W. Chantaweesomboon et al., "On performance study of UWB real time locating system," *2016 7th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES), Bangkok*, 2016, pp. 19-24.
- [19] J. Youn and Y. Cho, "Performance Study of an Ultra-Wideband Indoor Localization and Asset Tracking System," in title of *Ultra Wideband, Rijeka, Croatia, InTech Europe*, 2010.
- [20] R. Yarlagadda, I. Ali, N. Al-Dhahir, J. Hershey, "GPS GDOP Metric," *Radar, Sonar and Navigation IEE Proceedings*, vol. 147, no. 5, pp. 259-264, 2000.
- [21] J. Yan, C. C. J. M. Tiberius, P. J. G. Teunissen, G. Bellusci and G. J. M. Janssen, "A Framework for Low Complexity Least-Squares Localization With High Accuracy," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 9, pp. 4836-4847, Sept. 2010.
- [22] S. Marano, W. M. Gifford, H. Wymeersch and M. Z. Win, "NLOS identification and mitigation for localization based on UWB experimental data," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 7, pp. 1026-1035, September 2010.