

Üçgenleme İle Konumlandırmanın Hassasiyetinin Hata Yayılma Kanunu ile Belirlenmesi

Nezir DOĞAN¹, Önder Halis BETTEMİR^{2*}

^{1,2} İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

¹ nezirdogan22@gmail.com, ² onder.bettemir@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 03/05/2024;

Kabul/Accepted: 10/01/2025)

Öz: İç mekân konum sistemleri GPS konumlandırma sisteminin çalışmadığı bina içerisinde gerçekleştirilen sosyal uygulamalar için canlıların konumunu belirleme, nesnelerin interneti, üretimde otomasyon ve robotik uygulamalar amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Kişilerin hangi odaya veya bölgede olduğunu belirleyen uygulamalarda yeterli konum hassasiyeti kolaylıkla sağlanabilirken iç mekânın haritalanmasını amaçlayan uygulamalarda oldukça zahmetli ve pahalı ölçümlerin yapılmasını gerektirmektedir. Literatürde kullanılan alıcıların mesafe ölçme hassasiyetine bağlı olarak elde edilecek konum hassasiyetini inceleyen yeteri kadar çalışma bulunmamaktadır. Belirtilen literatür boşluğunu gidermek için bu çalışmada üçgenleme yöntemi ile gerçekleştirilen iç mekân konumlandırmasının hassasiyeti hata yayılma kanunu ile tahmin edilmiştir. Hata yayılmanın girdi parametreleri olarak üç adet istasyonun konumlarındaki belirsizlik ve istasyonlar ile gezici arasında ölçülen mesafelerin belirsizlikleri alınmıştır. Hata yayılma kanununun uygulanması için üçgenleme denklemlerinin girdi parametrelerine göre kısmi türevleri hesaplanmıştır. Yöntemin uygulanabilmesi için boyutları 10x10 metreden oluşan sanal bir odanın kenarlarına yerleştirilmiş üç adet istasyon noktasından odanın düzenli aralıklı ızgaranın düğüm noktaları üzerinde yapılacak konum belirleme işleminin hassasiyeti hesaplanmıştır. En düşük hata miktarının istasyon noktalarının ağırlık merkezi olan odanın orta bölgesinde gerçekleştiği, bir istasyondan uzaklaşıldığında istasyondan kaynaklanan hata miktarının arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca elde edilen hata değerlerinin komşuluklarına göre farkları alınarak göreceli hata miktarı incelenerek odanın merkezinden uzaklaşıldığında konumlandırma hatasının ve hata büyüklüğündeki değişimin arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonucunda iç mekân konumlandırmaya bağlı olarak yapılacak haritalandırma ve rölöve çalışmalarının doğruluğu ve ölçülen cisimlerin mutlak boyutlarının hataları belirlenmiştir. Çalışma ayrıca bir ölçme cihazının mesafe hassasiyetine göre üçgenleme hassasiyetini de ortaya çıkardığı için gereksiz pahalılıkta ölçme cihazı alınmasının önüne geçebilecektir.

Anahtar kelimeler: İç mekân konumlandırma; hata yayılma kanunu; üçgenleme.

Determination of Precision of Triangulation by Error Propagation Law

Abstract: Indoor location systems are widely used where the GPS positioning system does not provide location data. Social applications performed inside buildings, determining the location of living beings, the internet of things, automation in production, and robotic applications are examples for the implementation of indoor positioning. Aforementioned technique can provide sufficient location accuracy for the applications that requires the detection of which room or area people are in. On the other hand, obtaining sufficient accuracy requires laborious and expensive measurements for the indoor mapping applications. In the literature, effect of the accuracy of the distance measurement on the accuracy of position obtained by triangulation has not been discussed thoroughly. In this study to fill the aforementioned literature gap, precision of indoor positioning achieved by triangulation is estimated by the error propagation law. Uncertainties of the locations of three stations and uncertainties of the distances measured between the stations and the rover are taken as the input parameters of error propagation process. The partial derivatives of the triangulation equations of the error propagation equations with respect to the input parameters are calculated. Precision of the localization process conducted with the three station points placed on the sides of a virtual room is estimated at the joints of the formed regular mesh of a room with dimensions of 10x10 meters. It was concluded that the lowest amount of error occurred at the center of the room, which is the center of gravity of the station points, and that the amount of error caused by a station increased as the location is moved away from the center. Moreover, by examining the relative amount of error by taking the differences of the obtained error values with respect to their neighbors, it was observed that the positioning error and the change in the error size increased as it is moved away from the center of the room. Precision of positioning and the errors of the absolute dimensions of measured objects based on indoor mapping techniques are determined. This study also reveals the precision of a location obtained by triangulation conducted by a surveying device with a specific distance measurement accuracy, which can prevent the purchase of unnecessarily expensive surveying devices.

Key words: Indoor positioning; error propagation law; triangulation.

* Sorumlu yazar: onder.bettemir@inonu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0009-0005-9685-0740, ² 0000-0002-5692-7708.

1. Giriş

Yaşanan depremlerin ardından orta hasar düzeyinde hasar görmüş binaların deprem performans analizlerinin gerçekleştirilebilmesi ve güçlendirme projelerinin hazırlanabilmesi için mevcut halinin statik ve mimari projelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat mevcut binaların statik ve mimari projelerine tam uyularak yapılmamasına yaygın biçimde rastlanılmaktadır. Buna ek olarak eski yapıların statik ve mimari projelerinin kaybolması veya sadece taranmış görüntü biçiminde elde edilebilme ihtimali çok yüksektir. Belirtilen nedenler deprem performans analizi sürecinde bina içinde rölöve çalışmasının yapılmasını da gerektirmektedir.

Rölöve sırasında bina içerisinde incelemeler ve ölçümler yapılarak veri toplanır. Statik analiz için gerekli olan yapısal elemanların boyut ve konum bilgileri elde edilir. Eşyaların bulunduğu ve hasar görmüş bir binada rölöve çalışmalarını yürütmek deprem bölgesinde depremin ilk aylarında çok sık artçı depremler meydana geldiği için oldukça zahmetlidir. Zaman zaman ciddi büyüklükte meydana gelebilen artçı depremler, orta hasarlı binalarda rölöve çalışmalarını yürütecek ekiplerde ciddi endişe yaratabilmektedir. Bu nedenle binanın içinde en az sürede, minimum insan gücüyle rölöve çalışmalarının yürütülmesi ihtiyacı bulunmaktadır. Hızlı ve yüksek doğrulukta rölöve hazırlanabilmesi ağırlıklı olarak iç mekân konumlandırma sistemleri kullanılarak yapılan ölçümlere dayanmaktadır.

Teknolojinin gelişmesiyle beraber kişiler, taşıtlar ve diğer nesnelerin konumlarını tespit etmek mümkün hale gelmiştir. Uydu tabanlı konumlandırma sistemleri dış ortamlarda hassas bir şekilde konumlandırma yapabilmektedir. Ancak iç mekânlarda uydu sinyalleri duvarlar ve ortamda bulunan katı cisimler tarafından engellenerek zayıflamaktadır. Dış mekânda yüksek hassasiyete sahip uydu tabanlı konumlandırma sistemleri ile iç mekânda sinyallerin zayıf olması nedeniyle aynı hassasiyetle konumlandırma yapılamaz [1,2]. Bu nedenle iç mekânlarda uygulanacak konumlandırma teknolojileri için alternatif yöntemler gerekmektedir [3].

İç mekân konumlandırma sistemleri yaygın olarak konumu bilinen ve istasyon noktası olarak tanımlanan noktalar ile konumlandırma yapılacak nokta arasındaki mesafenin ölçülüp üçgenleme tekniği ile söz konusu noktanın koordinatlarının hesaplanmasına dayalıdır. İç mekân konumlandırma sistemleri doğruluk, duyarlılık, kapsama alanı, uyarlanabilirlik, ölçeklenebilirlik, maliyet ve karmaşıklık performans kriterleri üzerinden sınıflandırılabilir. Doğruluk, tahmin edilen konum ile gerçek konum arasındaki mesafedir. Duyarlılık, konumu belirlenmek istenen hareketli bir hedefin konum tahminin güncellenme hızını ifade etmektedir. Çevresel etkilerdeki değişiklikler konumlandırma sistemlerinin performanslarını etkileyebilmektedir. Konumlandırma sistemlerinin bu değişikliklerle başa çıkabilme yetenekleri uyarlanabilirliktir. Uyarlanabilir bir sistem daha yüksek konumlandırma doğruluğu sağlayabilir ve aynı zamanda kalibrasyon ihtiyacını önleyebilir [4].

Konumlandırma için kullanılan sensörlerden hiçbirisi tamamen doğru ölçümler yapmadığı için tahmin edilen konumun belirsizliğini dikkate alarak farklı sensörlerden gelen bilgileri birleştirmek çok önemlidir. Ölçüm belirsizliğinin yönetilmesi yeterli doğrulukta konumlandırma yapılabilmesi için önemlidir [5]. Konumlandırma süreci sinyal ölçümü ve konum hesaplama aşaması olmak üzere genel olarak iki aşamada incelenmektedir. İlk aşamada, referans ve hedef düğümler arasında iletilen sinyallerin, varış zamanı, yönü ve sinyal gücü gibi özellikleri alıcılar tarafından belirlenir. Bu sayede varış zamanı (*Time of Arrival – ToA*), alınan sinyal gücü (*Received Signal Strength – RSS*), varış açısı (*Angle of Arrival – AoA*) ve varış zaman farkı (*Time Difference Of Arrival – TDoA*) gibi sinyal parametreleri elde edilir. İkinci aşamada, daha önce elde edilen parametreler kullanılarak hedef düğüm noktasının konumu belirlenecektir. Ayrıca sinyal ölçümleri gerçek sistemlerde özellikle iç mekânlarda tamamen doğru olmadığından, sonuç doğruluğunun artırılması ve ölçüm gürültüsünün filtrelenmesi için optimizasyon tabanlı istatistiksel yöntemler kullanılır [6]. Bu çalışmada mevcut iç mekân konumlandırma sistemleri incelenmiş ve rölöve çalışması için üçgenleme yöntemi ile yeterli hassasiyette konumlandırma yapılabilme durumu hata yayılma kanunu ile analiz edilmiştir.

2. Yaygın İç Mekân Konumlandırma Teknikleri

İç mekân konumlandırma sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda sonuçların doğruluğunu artırmada Radyo Frekansı ile Tanımlama (*Radio Frequency Identification – RFID*), kızılötesi (*Infrared – IR*) sensörler, iBeacon ve akıllı telefonların konum belirleme bileşenleri kullanılmaktadır. Mobil cihazlar daha doğru sonuçlara ulaşma olasılığını artırırken, yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Cep telefonları veya kullanıcılara takılan sensörler sayesinde kullanıcı aktif olarak takip edilebilir ancak bu yöntemler kullanıcıların bu cihazları giymeleri veya yanlarında taşımaları gerektiğinden her zaman uygulanamamaktadır. Bununla birlikte IEEE 802.11 standardıyla uyumlu alıcılar ve vericiler kullanılarak beacon ve bluetooth üzerinden düşük maliyetli konumlandırma gerçekleştirilebilmektedir. Fakat belirtilen ucuz alıcıların sunduğu konum hassasiyeti düşüktür. İç mekânda

konumlandırma yapan sistemin yaygın olarak kullanılabilmesi için kolay ve hızlı biçimde kurulabilmelidir. Mevcut altyapı kullanılarak ek donanım gerektirmeyen sistemler tercih edilebilir [7, 8].

İç mekânda üçgenleme tekniği ile konumlandırma yapabilmek için RFID, Ultra Geniş Bant (*Ultra-wideband* – UWB), WiFi, Bluetooth ve ZigBee ağırlıklı olarak kullanılan teknolojilerdir. Bir konumlandırma sistemi ölçülecek hedef noktanın konumunu sinyalin fiziksel büyüklüğü, ölçüm metodu ve konum tahmini olmak üzere üç ayrı yöntemle tahmin eder. Sinyaller alıcı ve verici cihazlar arasında hareket ederek düğüm noktalarının konum bilgilerini iletir. ToA, TDoA, AoA, RSS teknikleri ile ölçülen istasyon ve gezici arasındaki mesafeyi konum bilgisine dönüştürmek için üçgenleme, yakınlık, ortam analizi ve parmak izi olarak sınıflandırılan algoritmalar kullanılır. Üçgenleme yönteminin zorluğu mesafe ölçümlerinin hatasız olmamasıdır. Ölçümlerin hata içermesi tüm dairelerin ortak bir noktada kesişmemesine neden olur. Ölçüm sayısı 3'ten fazlaysa konum belirleme multilaterasyon olarak adlandırılır ve en küçük kareler algoritması ile dairelere en yakın nokta tahmin edilerek bu sorun aşılabılır. İç mekân konumlandırma teknikleri arasında WiFi, Bluetooth, Bluetooth Düşük Enerji (*Bluetooth Low Energy* – BLE), ZigBee, RFID, Kızılötesi ve Sonar teknolojilerinin mesafe ölçüm ve/veya konumlandırma hassasiyetleri incelenmiştir.

2.1. Ağ sinyali tabanlı konumlandırma

İç mekân konumlandırmada kurulmuş sistemlerin yaygınlığı, düşük maliyetli oluşu ve engellerin bulunduğu karmaşık yapıyı görüş hattı olmayan (NLOS) ortamlardan etkilenmemesi nedenleriyle WiFi tabanlı konumlandırma sistemleri yaygın olarak tercih edilmektedir [1, 9, 10]. Konumlandırmada kanal frekans yanıtı (*Channel Frequency Response* – CFR) ve alınan sinyal gücü göstergesi (*Received Signal Strength Indicator* – RSSI) değerini kullanabilir. Konumla alakalı parmak izi toplama ve veritabanında saklanan değerlerle Yapay Sinir Ağı (YSA) eğitiminin ardından anlık elde edilen parmak izi ile YSA çıktısını değerlendirerek konumlandırma gerçekleştirilir. Parmak izi tabanlı iç mekân konumlandırma sistemleri kalibrasyon (çevrimdışı) ve konumlandırma (çevrimiçi) olmak üzere iki aşamadan oluşur. Çevrimdışı aşamada parmak izi haritaları oluşturulur. Çevrimiçi aşamada konumu belirlenmek istenen noktadan sinyal özellikleri ölçülür ve çevrimdışı aşamada oluşturulan harita ile karşılaştırılır. Kalibrasyon aşamasının zor olması, sisteme yeni kalibrasyon noktalarının eklenmesinde ve iç mekândaki nesnelerin değişikliğinde sinyal haritasının değişmesi parmak izi yönteminin dezavantajlarından [11]. WiFi sinyalleri duvar gibi katı engellerden geçebilir ve altyapısının yaygın olması nedeniyle ek bir donanım gerektirmemektedir. Bu durum maliyet açısından avantaj sağlar ve ekstra yazılım gerektirmeden konumlandırma yapılabilir. Doğruluk düzeyi erişim noktası sayısı ile ilişkili olmakla birlikte 20 ile 40 m arasındadır ve kapsama alanı 150 metreye kadar ulaşabilir [1, 11, 12].

2.2. Bluetooth tabanlı konumlandırma

Bluetooth tabanlı teknolojilerin menzili 10 cm ile 10 m arasındadır. Konum tahmini için genelde yakınlık ve RSS yaklaşımları kullanılır [13]. Bluetooth tabanlı konumlandırma teknolojisinin enerji tüketimi çok fazla olduğu için iç mekân konumlandırmada enerji tüketimi daha düşük olan “Bluetooth Low Energy” daha yaygın biçimde kullanılmaktadır. BLE teknolojisinin bağlantı hızı bluetooth teknolojisine göre düşük olsa da hızlı cihaz eşleştirme, düşük maliyet ve sinyal bozulmalarının az oluşu yöntemin avantajlarıdır [9].

Düşük Enerjili Mavi diş (Bluetooth Low Energy - BLE) bluetooth teknolojisi tabanlıdır ve daha az enerji tüketir. İç mekân konumlandırmada mekâna işaretçiler yerleştirilir ve bu işaretçilerin ortama yaydıkları sinyallerin sinyal gücü değeri kullanılarak konum tahmini yapılır. Bu sistemin basit olması ve konumlandırma doğruluğunun sisteme yerleştirilen işaretçilerin yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olması avantaj sağlar [2].

2.3. Ultra geniş band tabanlı konumlandırma

Ultra Geniş Band (Ultra – Wideband - UWB) sistemi dalga yansıması, ToF, ToA, TDoA, AoA prensiplerini kullanarak mesafe ölçer ve RSSI parmak izi haritaları oluşturmaya dayalı konumlandırma yapar. UWB, sahip olduğu 500 MHz ve daha üzeri geniş frekanslı bant genişliği sayesinde elde edilen yüksek çözünürlüklü zaman ve menzil avantajıyla hassas mesafe ölçümü elde edilebilmesini sağlar. Duvarlar ve mobilyalar gibi engeller nedeniyle çoklu yol etkisinin bulunduğu iç mekânlarda UWB geniş bant genişliği sayesinde sinyallerin zaman gecikmeli versiyonlarını kolayca tespit eder [14]. Konumları bilinen referans noktalarından ve konumu belirlenecek etiketlerden oluşur. Etiket doğru bir şekilde konumlandırılması için en az dört adet referans düğüm noktası gereklidir. Referans noktası sayısının artması konumlandırma doğruluğunu artırır. UWB sensörleri diğer teknolojilere kıyasla daha az güç tüketirler.

UWB tekniğinde düşük frekanslı darbeler ile sinyalin duvarlardan ve çeşitli nesnelerden geçebilmesi konumlandırma doğruluğunda artış sağlayarak cm düzeyinde doğruluk elde edilir. Yüksek bant genişliği sayesinde yüksek miktarda veri iletimi sağlanır ve kısa darbelerle çok yönlü girişim etkisini azaltarak ToA'nın daha kolay belirlenmesini ve diğer teknolojilere göre daha üstün olmasını sağlar. UWB teknolojisi konum tahmininde üçgenleme ve parmak izi yöntemlerini kullanır. Alıcı ve verici nokta arasındaki mesafeyi sinyallerin varış zaman farkı (TDoA) değerini kullanarak bulan ve az miktarda enerji ile yüksek boyutta veri transferi yapan UWB teknolojinin doğruluk değeri oldukça yüksektir. 150 metreye ulaşabilen geniş kapsama alanı ve 0,1 ile 0,3 metre arasında gerçekleşen hata büyüklüğü, yöntemi iç mekân konumlandırma için uygun bir çözüm olmasını sağlamaktadır. Fakat diğer tekniklere göre maliyeti yüksektir ve pahalı olması uygulamada sınırlayıcı bir faktördür [1, 2, 9, 12, 13, 15].

2.4. Zigbee tabanlı konumlandırma

Zigbee alıcı ve verici cihazlar arasındaki mesafeyi ölçmek için hedef düğüm noktasından yansıyan sinyalin faz kayması değerini kullanır. Zigbee teknolojinin avantajı düşük enerji tüketimi ve maliyetidir. Dezavantajları anti-parazit özelliğinin zayıf oluşu, konumlandırma hatasının büyüklüğü ve konumlandırma aralığının küçük olmasıdır [2, 13].

2.5. Radyo frekansı tabanlı konumlandırma

RFID radyo dalgaları, okuyucular ve etiketler arasında sinyal aktarımına dayalı bir teknolojidir. RFID sistemleri nesnelere yerleştirilmiş etiketlerden ve RFID okuyucularından oluşur. RFID etiketleri aktif ve pasif olarak ikiye ayrılır ve konumlandırmada etiketlerin varlığı algılanır. RFID tabanlı navigasyon sistemlerinde genellikle harici enerji kaynağı gerektirmeyen pasif etiketler kullanılır. RFID'nin kapsama alanı geniş olduğu için duvarlardan ve diğer engellerden kolayca geçebilir. RFID düşük maliyetli olması ve kolay uygulanabilir algoritmalarla konumlandırma yapabilmesi nedeniyle tercih edilir. Ancak konumlandırma doğruluğu yaklaşık 3 ile 5 metre arasındadır ve doğruluğu iyileştirmek için okuyucu sayısını artırmak maliyeti ve karmaşıklığı artırmaktadır. Konum tahmininde RSS, AoA, ToA ve TDoA kullanılır [16]. RFID ile en çok kullanılan yöntem yakınlık yöntemi olmakla birlikte RSS ile de konumlandırma yapılabilmektedir [13]. RFID tabanlı iç mekân konumlandırma sistemleri 1 ile 2 metre seviyelerinde doğruluk değerlerine ve 30 metreye ulaşabilen kapsama alanına sahiptir ve diğer sistemlerle birleştirilmesi zordur [2, 9, 12].

2.6. Kızılötesi tabanlı konumlandırma

Kızılötesi, görüş hattı gerektirmeyen, diferansiyel faz kayması, yakınlık ve varış açısı yöntemlerini kullanarak konumlandırma yapar [13]. IR ışınları kısa menzillidir ve sinyallerin belirli bir mesafeden sonra zayıflamasına ve etkin menzilin sınırlı olmasına neden olabilir. Ayrıca, IR sinyallerinin etkili olabilmesi için ortamda engel ve parazit bulunmamalıdır. Açık havada veya düşük engel içeren bir ortamda IR daha iyi performans sağlar [12].

2.7. Sonar tabanlı konumlandırma

Ultrasonik (*Ultrasound* - US) konumlandırma teknolojileri alıcı ve verici cihazlar arasındaki mesafeyi ultrason dalgalarının ToA ölçümlerini kullanarak tahmin eden kısa menzilli bir yöntemdir [13]. Elektronik etiketler ve gezici bir alıcıdan oluşan ultrasonik konumlandırma sistemleri ses hızı yardımıyla sabit etiket ve gezici arasındaki mesafenin belirlenmesi prensibiyle çalışır. Ses dalgalarının iletim hızı hava şartlarından etkilenir. Ultrasonik konumlandırma sistemleri kısa menzillidir, kapsama alanı 2 ile 10 m arasındadır, engellere karşı hassastır ve santimetre seviyesinde konumlandırma doğruluğuna sahiptir [2, 12].

Ultrasonik tabanlı iç mekân konumlandırma sistemleri santimetre düzeyinde yüksek doğruluğa ve hassasiyete sahip olmasının yanı sıra diğer iç mekân konumlandırma sistemlerine göre daha düşük maliyetlidir. US sistemler ses hızından yararlanarak ToF ölçümü ile konumlandırma yapar. Ses hızı ortam koşullarına bağlı olduğu için sıcaklık ve basınç ölçülerek düzeltme yapılması gereklidir [15].

3. Kaynak Taraması

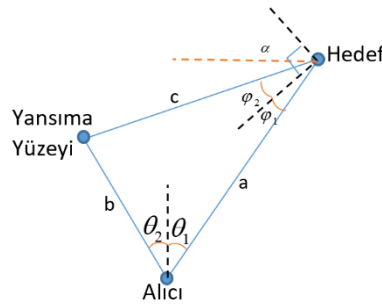
Yaman vd. uygun maliyetli ve benzerlerine yakın doğrulukta iç mekân konumlandırma sistemleri için bir elektronik kart tasarımı ve analiz programı geliştirmişlerdir [7]. 3 “Konum Verici Elektronik Kart”, 1 “Konum Alıcı Elektronik Kart” ve 1 “Konum Alıcı-Verici Elektronik Kart” tasarlanmıştır. Sistemin hata düzeyi mevcut çalışmalarla kıyaslanmış ve benzer performans sergilediği belirlenmiştir. Tunç vd. iç mekân konumlandırma sistemlerinin hata düzeylerini azaltmak için parmak izi tabanlı RSSI (alınan sinyal gücü göstergesi) değerine dayalı biçimde yapay sinir ağı (YSA) ile mekânı 4 ya da 16 hücreye ayırmayı önermiştir. 4,25 x 1,75 m’lik iç mekânda 4 ve 16 hücreli konumlandırmada sırasıyla %94,4 ve %98,6 doğruluk oranları elde edilmiştir [17].

Üstebay vd. kablosuz erişim noktalarının (KEN) sinyal haritalarını kullanarak iç mekânda konumlandırma yapılmasını sağlayan bir model önermiştir [18]. Önerilen modelde, K-En yakın komşuluk (K-EYK), Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Doğrusal Ayırtaç Analizi (DAA) yöntemleri uygulanmıştır. Küçültülmüş sinyal haritasının kullanıldığı modelin, orijinal sinyal haritasına sahip olan modele göre %70 daha az KEN kullanarak konum tespiti yapabildiği, %91 doğruluk oranına sahip olduğu ve %75 daha hızlı çalıştığı tespit edilmiştir.

Tunca vd. Android işletim sistemli akıllı telefonlarla iç mekân konumlandırma yapabilmek için yapay sinir ağı tabanlı lokalizasyon algoritması geliştirmiştir [8]. Geliştirilen yöntem ofis ve ev ortamlarında test edilmiştir. Ofis deneyinde 6x6 m², ev deneyinde ise 7x5,5 m² ebatlarında mekân kullanılmıştır. Aynı nokta için ofis deneyinde elde edilen konum değerlerinin %68’i 1,76 m², ev deneyinde elde edilen konum değerlerinin %68’i ise 1,44 m² alan içerisinde kalmıştır. Akçura vd. açık veya kapalı bir ortamda navigasyon görevi için otonom robot geliştirmiştir [19]. Lazer sensör, akü, elektronik denetim modülleri ve bilgisayarı birlikte taşıyabilecek kapasitede dört tekerlekli bir araç olarak geliştirilmiştir. Matlab’ta geliştirilen yazılımda bilgisayar ile SICK LMS 100 mesafe sensörü seri haberleşme portu ile bağlanmış ve sensör verileriyle konum ve doğrultuyu belirlenmektedir.

Kablosuz sinyal veya görüntü tabanlı parmak izi teknolojileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kablosuz sinyal veya görüntülerin alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI) değerlerine göre parmak izi haritaları oluşturulur ve konum tahmini yapılır. Bu teknolojilerin dezavantajı ise iç mekânda duvar veya eşyaların konum ve yön değişiklikleri sinyal ve görüntülerin değişmesine neden olarak parmak izi haritasının yeniden oluşturulmasını gerektirmesidir [3]. Ortamda değişmeyen veya çok az değişiklik gösteren nokta yer işaretleri olarak belirlenir. Yer işaretlerinin hepsi çalışmaya dahi doğru çalışan yer işaretleri ile konum tahmini yapılabildiği için parmak izi yöntemine göre daha tutarlıdır. Ortam yapısının sıklıkla değiştiği alışveriş merkezi gibi karmaşık yapıların konumlandırılmasında yer işareti tekniği etkin bir şekilde kullanılır. Yer işareti yönteminde depolanan veri boyutunun parmak izi yöntemine göre daha az olması konumlandırma maliyetini azaltır [3].

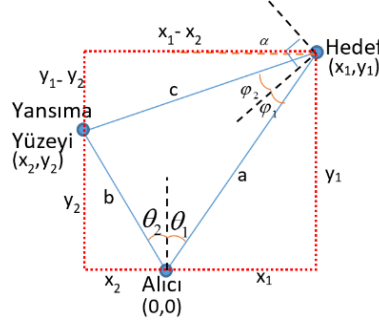
Soltanaghaei vd. hedef cihazın konumunu tek bir alıcı ile belirleyen yeni bir konumlandırma tekniği olan çok yollu üçgenlemeyi önermiştir. Bu teknikte çok yollu yansımalar konumlandırmayı geliştirmek için elemek yerine kullanılmıştır. Çok yollu üçgenlemede hedef ve alıcı cihaz arasında doğrudan ve yansıyan yol olmak üzere iki yol vardır. Bu yöntem hedefin yönünü belirlemek için doğrudan yolun AoA ve AoD ölçümlerini, hedefin yansıtıcıya alıcıya göre konumunu belirlemek için yansıyan yolun AoA ve AoD ölçümlerini kullanır. Hedefin konumunun belirlenmesinde ise iki yol arasındaki göreceli ToF ölçümü kullanılır. Doğrudan ve yansıyan yollar, köşelerinde alıcı cihaz, hedef cihaz ve yansıma yüzeyleri bulunan üçgen oluşturur [20].



Şekil 1. Çok yollu üçgenleme geometrisi.

Sinyal, hedeften ϕ_1 açısıyla alıcıya iletilir, a ile ifade edilen mesafe kadar yayılır ve alıcıya θ_1 açısıyla ulaşır. Çok yollu yansıma ϕ_2 açısıyla hedeften alıcıya iletilir, b+c ile ifade edilen mesafe kadar yol kat ederek alıcıya θ_2 açısıyla ulaşır. θ_1 : Doğrudan yolun AoA’sı; ϕ_1 : Doğrudan yolun AoD’si; θ_2 : Yansıyan yolun AoA’sı; ϕ_2 : Yansıyan yolun AoD’si olarak ifade edilmektedir. MonoLoco, çok yollu etkileri çözmek için AoA, AoD ve ToF’ların

yarattığı tahmin edilebilen faz kaymalarından yararlanmıştır. $\Phi(\theta_1)$ ek faz kayması AoA ve antenler arası mesafenin fonksiyonudur.



Şekil 2. Yansıma sonucu faz kaymasının gösterimi.

MonoLoco kütüphanesi ile Şekil 2’de sunulan geometride oluşan bilinmeyenler çözülür. $\alpha = \varphi_1 + \theta_1$ denkleminde α belirlenir ve $XY = [x_1, y_1, x_2, y_2]$ konum parametreleri, $[XY] = \arg \min_{XY} S(XY)$ doğrusal olmayan optimizasyon problemi çözülerek bulunur. Çok yollu üçgenlemenin temel avantajı, tek bir alıcıyla yardımsız cihaz lokalizasyonunun sağlanmasıdır. Bu yöntem, AP’lerle koordinasyon ihtiyacını ortadan kaldırır ve kesin ToF (Zamanın Geçışı) ölçümlerine dayanmak yerine rToF (Göreceli Zamanın Geçışı) prensibini kullanır. Farklı frekansta olan sinyallerin göreceli faz değerlerine dayanan rToF, saat senkronizasyonu gerektirmediği için verici ile koordinasyon sağlamadan tek alıcıyla konumlandırma yapılabilir.

Soltanaghaei vd. çok yollu sinyal fonksiyonun optimizasyonu için 20 cm x 20 cm boyutlarında ızgara oluşturmuş ve her nokta için $S(XY)$ fonksiyonunu kullanarak çoklu yol izleyen sinyali belirleyip hedef ve alıcının konumunu yüksek doğrulukta belirlemeyi hedeflemiştir. Ölçümlerde 0,5m’lik medyan lokalizasyon hatası ve 6,6 derecelik medyan oryantasyon hatası elde edilmiştir [20].

Jekabsons vd. ortamda seçilen kalibrasyon noktalarından RSS ölçümü yaparak n adet (q_i, r_i) ($i=1,2,...,n$) ölçüm radyo haritasına eklenmiştir. Ağırlıklı k – en yakın komşular algoritması ile bilinmeyen konumda ölçülen r vektörüne en yakın $r_{i1}, r_{i2}, ..., r_{ik}$ değerlerinin k indisini 2 olarak belirlemiş ve her nokta için q tahmini konumu hesaplanmıştır. Riga Teknik Üniversitesinde bulunan 5 katlı bir binanın son katında yapılan deneylerde 860 m² alanda dahili kablosuz karta sahip dizüstü bilgisayar ve 82 kalibrasyon noktası kullanılmıştır. Yalnızca güçlü WiFi erişim noktalarından alınan sinyal gücü verilerinden yararlanılarak hesaplanan konumun ortalama hata düzeyi 2,43 m iken zayıf WiFi erişim noktalarından alınan sinyal gücü verilerinden de yararlanıldığında hata düzeyi ortalama 2,19 m olarak belirlenmiştir [21].

Chen vd. önerdikleri sistemde eşyalı ofis ortamında %99,91 ve %100 konum tespit oranları ve 5 cm mesafeli konumlar için görüş hattı olan (*Line of Sight* – LOS) ve görüş hattı olmayan (*Non-line of Sight* – NLOS) ortamlar için sırasıyla %1,81 ve %1,65 yanlış alarm oranlarını elde etmişlerdir. Önerilen sistem 0,5 cm birim mesafe ile 1 ile 2 cm aralığında konumlandırma doğruluğu elde etmiştir [22, 23]. Qian vd. farklı hız ve konumlara sahip hareketin, sinyal yayılma yollarındaki sapmalarla insan hareketinin hızını, yönünü ve konumunu desimetre düzeyinde tahmin etme yeteneği sunan WiFi tabanlı Widar’ı önermiştir [24]. Widar, hedeflere ulaşmak için istatistiksel öğrenme metotları yerine WiFi sinyallerinin Kanal Durum Bilgilerine (*Channel Status Information* – CSI) başvurarak kullanıcıların anlık olarak hız, yön ve konumlarını belirlemiştir. Sinyallerin yayılım yolu uzunluğunun değişim oranı (*Path Length Change Rate* – PLCR) ile kullanıcının hızı ve konumu tahmin edilmiştir. Cihazların sadece köşelere ve sadece bir tarafa yerleştirildiği 4x4 m² izleme alanına sahip iki düzencekle yöntem denenmiştir. Hız tahmini için Widar’ı max PLCR (bağlantılardan en büyük PLCR’nin yarısını alan) ve single PLCR (sadece bir bağlantı mevcut olduğunda) ile karşılaştırmıştır. Widar, Max PLCR ve Single PLCR medyan hata oranları sırasıyla %13, %19 ve %40’tır. COTS WiFi cihazlarıyla Widar, 25cm ve 38cm konum hatası ve %13 bağıl hız hatası elde edilmiştir.

Silvia vd. hedefler, düğümler, bir sunucu ve üç temel cihazdan oluşan bir sistem kurmuştur. Düğümler ortamda bulunan nesnelerin hareketlerinin izlenmesi ve ölçülmesi için binaya yerleştirilen sabit cihazlardır. Düğümler, sunucuya kablosuz LAN veya Ethernet ile bağlıdır ve ölçümlerin doğru yapılabilmesi için en az dört düğüm noktası gereklidir. Hedefler ise takip edilmek istenen nesnelere yerleştirilen cihazlardır. Sistem 700 m² alana sahip bir garajda test edilmiştir. Ölçümlerin %70’inde hata değerleri 0,4 metreden daha düşüktür [12].

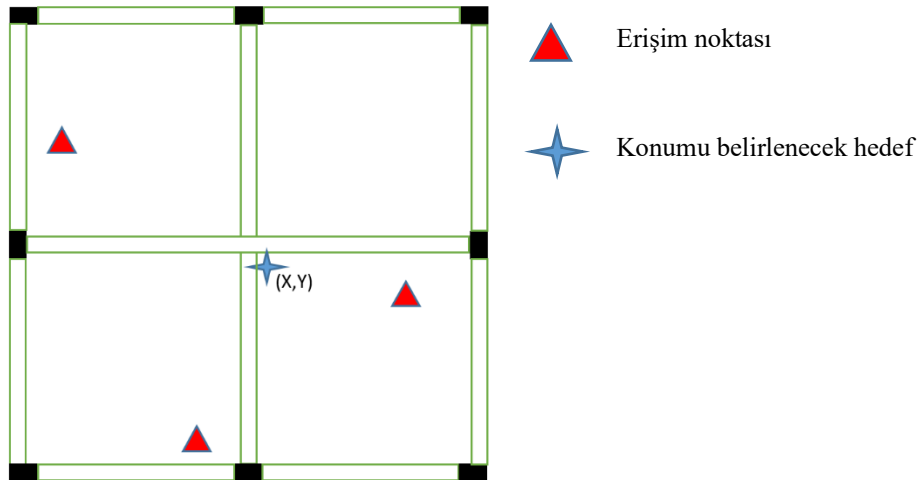
Liu vd. WiFi ile kullanıcıların konumlarını aktif ve pasif konumlandırma ile belirlemiştir. Olasılıksal algoritma sabit bir konumdaki her erişim noktasından alınan RSS değerlerinin olasılıksal dağılım fonksiyonunu oluşturur ve veritabanında ortak dağılım fonksiyonu olarak birleştirilmiş parmak izi olarak kaydeder. Ardından alıcı cihazın RSS değeri için veritabanında arama yaparak en olası konumunu belirler [10].

Dabove vd. düşük maliyetli konumlandırma ve izleme sağlayan Pozyx'i incelemişlerdir. İç mekân oda testinde 6,44 m x 4,91 m boyutlarındaki odanın köşelerine yükseklikleri farklı dört adet istasyon yerleştirilmiş ve iki farklı algoritma ile 100 ± 25 mm 3 boyutlu ortalama doğruluk değeri elde edilmiştir. Dar koridor testinde 1,8 m x 6,8 m boyutlarında koridora 4 adet istasyon yerleştirilmiş ve menzil ölçüm ortalama doğruluğu yaklaşık 150 ± 50 mm, üç boyutlu konumlandırma doğruluğu yaklaşık 60 ± 45 mm olarak belirlenmiştir [14]. Vleugels vd. buz hokeyinde oyuncuların kullandıkları sopalara IMU (Ataletsel Ölçüm Birimi) yerleştirip aktivite tespiti ve tanımlaması yaparak Decawave DWM1001 modül serisi ile UWB yönteminin konumlandırma performansını ölçmüştür. Güncelleme oranı yüksek olduğu için TDoA yaklaşımıyla konumlandırma yapılmıştır. En uzun menzil etiketin çubuğun içinde olduğu durumda 20 m, etiketin açık alanda olduğu durumda 35 m olarak ölçülmüştür. Etiket çubuğun içinde olduğu durumdaki mesafe tahmini ile etiketin açık alanda olduğu durumdaki mesafe tahmini arasındaki fark 43 mm'dir [25]. Alışkan vd. ESP8266-7 WiFi modülü, STM32F103C mikro çipi ve UWB uyumlu DWM1000 sinyal alıcı verici modül ile konumlandırma yapmıştır. TDoA algoritması ile ölçümler yaparak Kalman filtresi uygulanan ve uygulanmayan ölçümlerin hatalarını incelemiştir. Kalman filtresi uygulanmadan ortalama 24,69 cm, Kalman filtresi uygulanarak ortalama 9,24 cm konum hatası elde etmiştir. Alıcı cihazların optimum pozisyonunun dar açılı üçgen oluşturacak şekilde olduğu tespit edilmiş ve bu pozisyonda 24,69 cm olan konum hatası %9,55 iyileşerek 22,33 cm olarak tespit edilmiştir [1].

4. Yöntem

Literatür taramasında iç konumlandırma sistemlerinin konumlandırma hassasiyetinin yaygın olarak sistem kurulduktan sonra değerlendirildiği, sistemin konumlandırma hatasının kurulum öncesi istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmediği görülmüştür. Belirtilen durum istenilen konumlandırma hassasiyetinin sağlanabilmesi için hangi hassasiyete sahip alıcıların temin edilmesi gerektiğinin önceden bilinmemesine yol açmaktadır. Bu durum gereğinden pahalı alıcıların tercih edilmesi veya istenilen hassasiyette konum bilgisinin elde edilememesi risklerini doğurmaktadır. Belirtilen riskin önlenmesi için bu çalışmada hata yayılma kanunu ile iç mekân konumlandırma hassasiyeti istasyon konumları ve istasyon ile gezici alıcı arasındaki mesafelerin hataları dikkate alınarak tahmin edilmesini sağlayan denklemler oluşturulmuş ve gerekli kısmi türevler hesaplanmıştır.

Hata yayılma kanunu arazi ölçümleri ve uydu görüntülerinin haritalanması işlemlerinin hata değerlerini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [26, 27]. Hata yayılma kanunu girdi parametrelerinin sonuca etkisi kısmi türevler ile hesaplar. Bunun için girdi parametrelerinin hata değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatür taraması ile elde edilen mesafe ölçüm hassasiyet değerleri dikkate alınarak iç mekân konumlandırma yönteminin hassasiyeti hata yayılma kanunu ile incelenmiştir. Konumlandırma hassasiyeti Şekil 3'te sunulan geometrideki mekân için tahmin edilmiştir.



Şekil 3. Ölçme geometrisinin tanımlanması.

Üçgenleme yöntemi ile konumlandırılacak noktanın X ve Y koordinatları Eşitlik 1 ve 2’de sunulduğu gibi hesaplanmaktadır [4, 17].

$$X = \frac{\begin{vmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) & 2(y_2 - y_1) \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}} \quad (1)$$

$$Y = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ 2(x_3 - x_1) & (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}} \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve 2’de yer alan d_1 , d_2 ve d_3 terimleri sırası ile 1, 2 ve 3 numaralı istasyonlar ile alıcı arasında ölçülen mesafeleri tanımlamaktadır. Eşitlik 1’deki determinat hesaplamaları açık haliyle Eşitlik 3’te, Eşitlik 2’de sunulan denklemin açık hali Eşitlik 4’te sunulduğu gibi yazılmaktadır.

$$X = \frac{2(y_3 - y_1)[(d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2)] - 2(y_2 - y_1)[(d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2)]}{4(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - 4(y_2 - y_1)(x_3 - x_1)} \quad (3)$$

$$Y = \frac{2(x_2 - x_1)[(d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2)] - 2(x_3 - x_1)[(d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2)]}{4(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - 4(x_3 - x_1)(y_2 - y_1)} \quad (4)$$

Eşitlik 3 ve 4’te yer alan parantezler açıldığında ve gerekli sadeleştirmeler yapıldığında sırası ile Eşitlik 5 ve 6’da sunulan denklemler elde edilir.

$$X = \frac{\begin{vmatrix} 2d_1^2 y_3 - 2d_1^2 y_2 - 2d_2^2 y_3 + 2d_3^2 y_2 + 2d_2^2 y_1 - 2d_3^2 y_1 - 2x_1^2 y_3 + 2x_1^2 y_2 + 2x_2^2 y_3 \\ -2x_3^2 y_2 - 2x_2^2 y_1 + 2x_3^2 y_1 - 2y_1^2 y_3 + 2y_1^2 y_2 + 2y_2^2 y_3 - 2y_3^2 y_2 - 2y_2^2 y_1 + 2y_3^2 y_1 \end{vmatrix}}{4x_2 y_3 - 4x_2 y_1 - 4x_1 y_3 - 4x_3 y_2 + 4x_1 y_2 + 4x_3 y_1} \quad (5)$$

$$Y = \frac{\begin{vmatrix} 2d_1^2 x_2 - 2d_1^2 x_3 - 2d_3^2 x_2 + 2d_2^2 x_3 + 2d_3^2 x_1 - 2d_2^2 x_1 - 2x_1^2 x_2 + 2x_1^2 x_3 + 2x_3^2 x_2 \\ -2x_2^2 x_3 - 2x_3^2 x_1 + 2x_2^2 x_1 - 2y_1^2 x_2 + 2y_1^2 x_3 + 2y_3^2 x_2 - 2y_2^2 x_3 - 2y_3^2 x_1 + 2y_2^2 x_1 \end{vmatrix}}{4x_2 y_3 - 4x_2 y_1 - 4x_1 y_3 - 4x_3 y_2 + 4x_1 y_2 + 4x_3 y_1} \quad (6)$$

Üçgenleme ile elde edilen konumun hassasiyeti hata kaynaklarının ölçülen 3 mesafe ve 3 istasyon noktalarının konum hatalarına bağlı olarak hata yayılma kanunu ile tahmin edildiğinde ölçülen konumun x ve y koordinatlarının hassasiyetleri sırası ile Eşitlik 7 ve 8’de sunulan denklemlerle tahmin edilir.

$$\sigma_X = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial d_1} \sigma_{d_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial d_2} \sigma_{d_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial d_3} \sigma_{d_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_3} \sigma_{x_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial y_1} \sigma_{y_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial y_2} \sigma_{y_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial y_3} \sigma_{y_3}\right)^2} \quad (7)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial d_1} \sigma_{d_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial d_2} \sigma_{d_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial d_3} \sigma_{d_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_3} \sigma_{x_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial y_1} \sigma_{y_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial y_2} \sigma_{y_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial y_3} \sigma_{y_3}\right)^2} \quad (8)$$

Elde edilen koordinat konum hata değerleri Eşitlik 9’da belirtilen ifade ile birleştirilerek 2 boyutlu mutlak konum hatası elde edilir.

$$\sigma_K = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} \quad (9)$$

Eşitlik 7 ve 8’de yer alan kısmi türev denklemleri aşağıda sunulmuştur. X koordinatının mesafelere göre kısmi türevleri Eşitlik 10-12’de gösterilmiştir.

$$\frac{\partial X}{\partial d_1} = \frac{(4d_1y_3 - 4d_1y_2)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \quad (10)$$

$$\frac{\partial X}{\partial d_2} = \frac{(4d_2y_1 - 4d_2y_3)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \quad (11)$$

$$\frac{\partial X}{\partial d_3} = \frac{(4d_3y_2 - 4d_3y_1)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \quad (12)$$

Eşitlik 13-15’te sunulan denklemler konumlandırılacak noktanın X koordinatının 3 istasyon noktasının her birinin x koordinatına göre kısmi türevlerini ifade etmektedir.

$$\frac{\partial X}{\partial x_1} = \frac{(4x_1y_2 - 4x_1y_3)(4x_1y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4y_2 - 4y_3) \times (PAY(X))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial X}{\partial x_2} = \frac{(4x_2y_3 - 4x_2y_1)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4y_3 - 4y_1) \times (PAY(X))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial X}{\partial x_3} = \frac{(4x_3y_1 - 4x_3y_2)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4y_1 - 4y_2) \times (PAY(X))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (15)$$

Eşitlik 16-18’de sunulan denklemler konumlandırılacak noktanın X koordinatının 3 istasyon noktasının her birinin y koordinatına göre kısmi türevlerini içermektedir.

$$\frac{\partial X}{\partial y_1} = \frac{(2d_2^2 - 2d_3^2 - 2x_2^2 + 2x_3^2 - 4y_1y_3 + 4y_1y_2 - 2y_2^2 + 2y_3^2)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_3 - 4x_2) \times (PAY(X))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (16)$$

$$\frac{\partial X}{\partial y_2} = \frac{(2d_3^2 - 2d_1^2 + 2x_1^2 - 2x_3^2 + 2y_1^2 + 4y_2y_3 - 2y_3^2 - 4y_2y_1)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_1 - 4x_3) \times (PAY(X))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (17)$$

$$\frac{\partial X}{\partial y_3} = \frac{(2d_1^2 - 2d_2^2 - 2x_1^2 + 2x_2^2 - 2y_1^2 - 2y_2^2 - 4y_3y_2 + 4y_3y_1)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_2 - 4x_1) \times (PAY(X))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (18)$$

Eşitlik 19-27’de sunulan denklemler Y koordinatının girdi parametrelerine göre kısmi türevlerini içermektedir. Eşitlik 19-21’de sunulan denklemler mesafeye göre kısmi türevleri içermektedir.

$$\frac{\partial Y}{\partial d_1} = \frac{(4d_1x_2 - 4d_1x_3)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \quad (19)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial d_2} = \frac{(4d_2x_3 - 4d_2x_1)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \quad (20)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial d_3} = \frac{(4d_3x_1 - 4d_3x_2)}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)} \quad (21)$$

Eşitlik 22-24’te sunulan denklemlerde istasyon noktalarının x koordinatına göre kısmi türevleri sunulmuştur.

$$\frac{\partial Y}{\partial x_1} = \frac{(2d_3^2 - 2d_2^2 - 4x_1x_2 + 4x_1x_3 - 2x_3^2 + 2x_2^2 - 2y_3^2 + 2y_2^2)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4y_2 - 4y_3) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_2} = \frac{(2d_1^2 - 2d_3^2 - 2x_1^2 + 2x_3^2 - 4x_2x_3 + 4x_2x_1 - 2y_1^2 + 2y_3^2)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4y_3 - 4y_1) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (23)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_3} = \frac{(2d_2^2 - 2d_1^2 + 2x_1^2 + 4x_3x_2 - 2x_2^2 - 4x_3x_1 + 2y_1^2 - 2y_2^2)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4y_1 - 4y_2) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (24)$$

Eşitlik 25 – 27’de sunulan denklemlerde istasyon noktalarının y koordinatına göre kısmi türevleri sunulmuştur.

$$\frac{\partial Y}{\partial y_1} = \frac{(4y_3x_3 + 4y_1x_2)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_3 - 4x_2) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (25)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial y_2} = \frac{(4y_2x_1 - 4y_2x_3)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_1 - 4x_3) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (26)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial y_3} = \frac{(4y_3x_2 - 4y_3x_1)(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1) - (4x_2 - 4x_1) \times (PAY(Y))}{(4x_2y_3 - 4x_2y_1 - 4x_1y_3 - 4x_3y_2 + 4x_1y_2 + 4x_3y_1)^2} \quad (27)$$

Kısmi türev denklemlerinde yer alan PAY(X) ve PAY(Y) terimlerinin açık ifadesi Eşitlik 28 ve 29’da sunulmuştur.

$$PAY(X) = \left[\begin{aligned} &2d_1^2y_3 - 2d_1^2y_2 - 2d_2^2y_3 + 2d_3^2y_2 + 2d_2^2y_1 - 2d_3^2y_1 - 2x_1^2y_3 + 2x_1^2y_2 + 2x_2^2y_3 \\ &- 2x_3^2y_2 - 2x_2^2y_1 + 2x_3^2y_1 - 2y_1^2y_3 + 2y_1^2y_2 + 2y_2^2y_3 - 2y_3^2y_2 - 2y_2^2y_1 + 2y_3^2y_1 \end{aligned} \right] \quad (28)$$

$$PAY(Y) = \begin{bmatrix} 2d_1^2x_2 - 2d_1^2x_3 - 2d_3^2x_2 + 2d_2^2x_3 + 2d_3^2x_1 - 2d_2^2x_1 - 2x_1^2x_2 + 2x_1^2x_3 + 2x_3^2x_2 \\ -2x_2^2x_3 - 2x_3^2x_1 + 2x_2^2x_1 - 2y_1^2x_2 + 2y_1^2x_3 + 2y_3^2x_2 - 2y_2^2x_3 - 2y_3^2x_1 + 2y_2^2x_1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

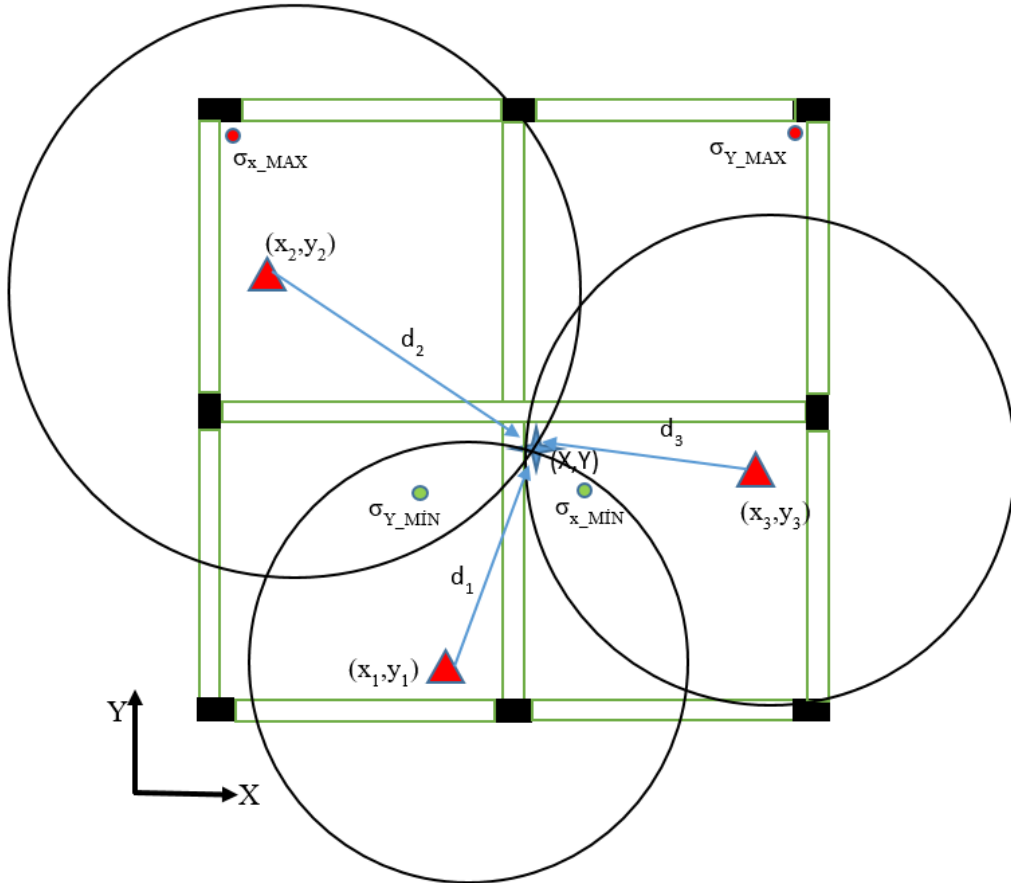
Kısmi türev denklemleri ve ölçme hassasiyeti değerlerinin denklemlerde yerine yazılması ile konumlandırma hassasiyeti hesaplanır. İç mekânın farklı konumları için gezici ve istasyonlar arasındaki mesafe değerleri girilip denklemlerin uygulanması ile konumlama hassasiyetleri ilgili konum için hesaplanır ve konumlama tutarlılığı belirlenebilir.

5. Vaka Çalışması

Yöntem kısmında açıklanan denklemlerin uygulaması Şekil 4'te sunulan hipotetik iç mekânda gerçekleştirilmiştir. Ölçülen konumun hassasiyeti Tablo 1'de sunulan girdi parametrelerinin hassasiyet değerlerine bağlı olarak hesaplanmıştır.

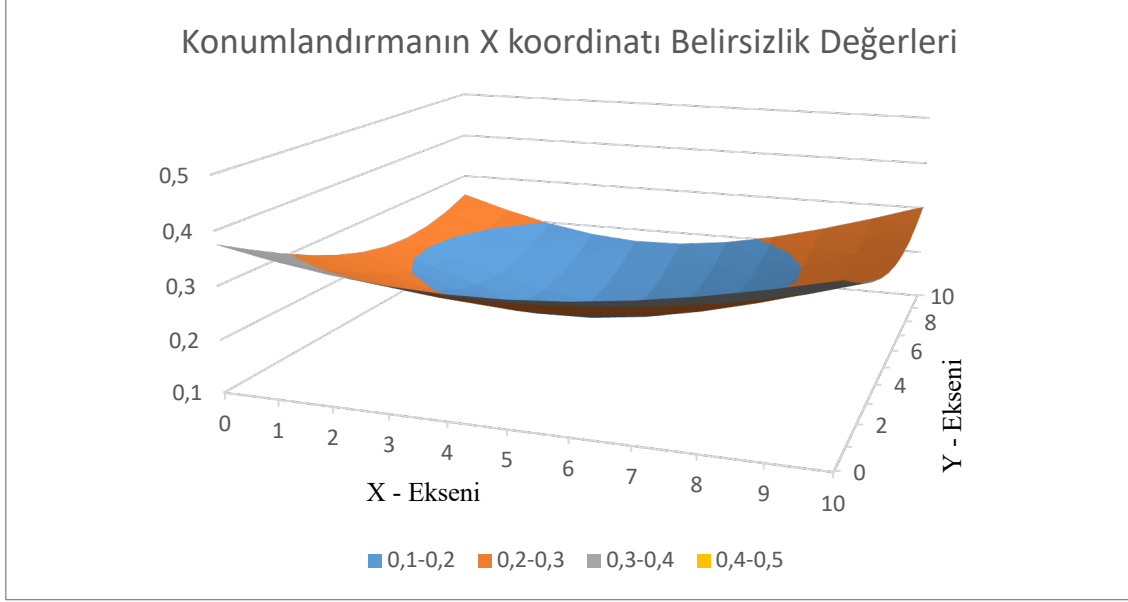
Tablo 1. Hata yayılma kanunu ile belirsizlik tahmininin girdi parametreleri.

İstasyon	Konum _x	Konum _y	Belirsizlik (m)	Mesafe	Belirsizlik (m)
1	3,5	0,3	0,05	d ₁	0,1
2	2,5	6,2	0,05	d ₂	0,15
3	8,2	4	0,05	d ₃	0,2



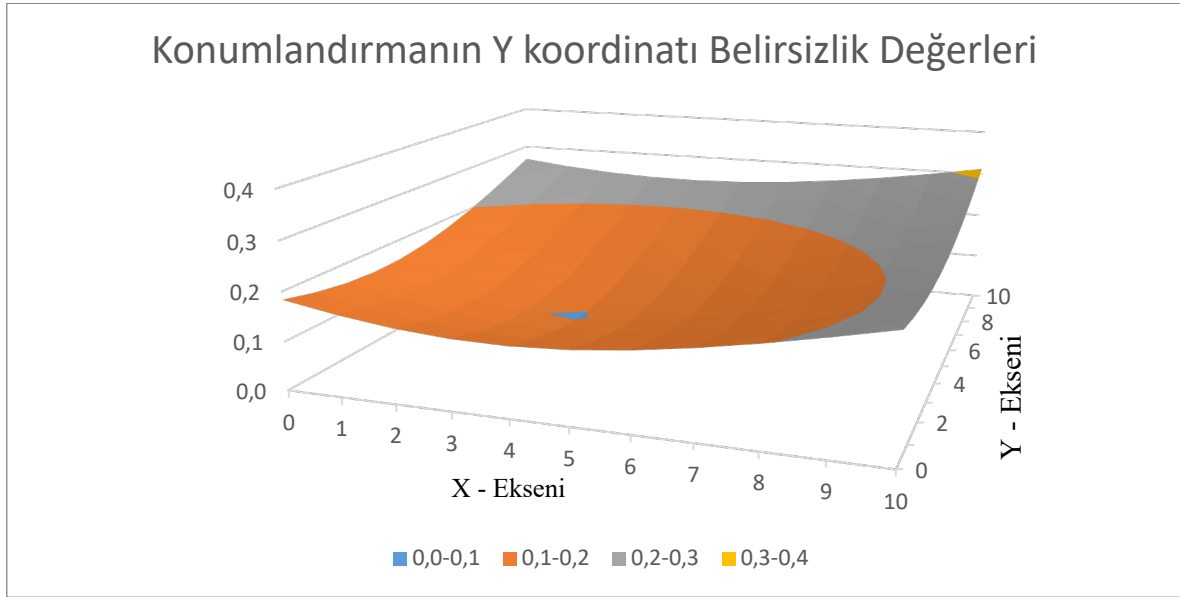
Şekil 4. Üçgenleme yönteminin gösterimi.

İç konumlandırmanın simüle edildiği alan 10 x 10 m² boyutundadır. İstasyon noktalarının konumları Tablo 1’de sunulmuş ve Şekil 4’te gösterilmiştir. Mekân bir metrelik kare ızgaralara ayrılmış ve ızgaraların kesişimleri toplam 121 nokta oluşturmuştur. Konumlama hassasiyeti belirtilen 121 noktada hata yayılma kanunu ile hesaplanmıştır. Eşitlik 7 uygulanarak elde edilen konumlandırmanın x koordinatının hassasiyet değerleri Şekil 5’te sunulmuştur. En düşük hata değeri x=7, y=4 noktasında $\pm 0,112$ m olarak elde edilirken en yüksek konumlandırma hatası x=0, y=0 noktasında $\pm 0,410$ m olarak elde edilmiştir.



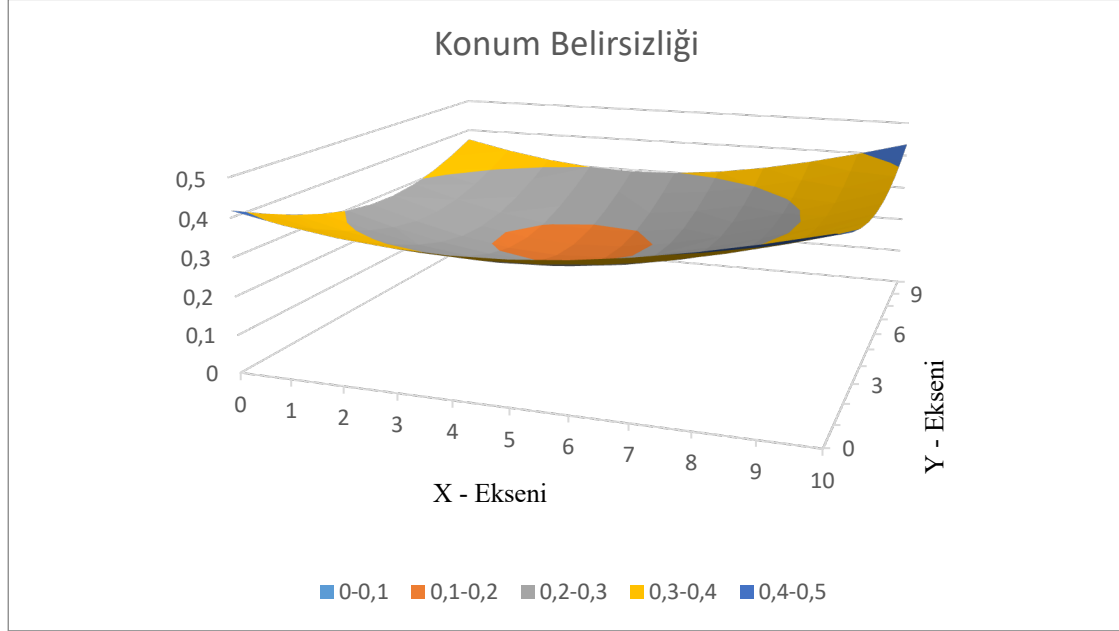
Şekil 5. Konumlandırmanın X – koordinatının belirsizliği.

Eşitlik 8 uygulanarak elde edilen konumlandırmanın y koordinatının hassasiyet değerleri Şekil 6’da sunulmuştur. En düşük hata değeri x=3, y=4 noktasında $\pm 0,099$ m iken en yüksek konumlandırma hatası x=10, y=10 noktasında $\pm 0,312$ m olarak elde edilmiştir.



Şekil 6. Konumlandırmanın Y – koordinatının belirsizliği.

Eşitlik 9 uygulanarak elde edilen mutlak konumlandırma hassasiyet değerleri Şekil 7’de sunulmuştur. Ayrıca sonuçlar metre biriminde tablo halinde Tablo 2’de verilmiştir. En düşük hata değeri $x=6, y=4$ noktasında $\pm 0,180$ m iken en yüksek konumlandırma hatası $x=0, y=10$ noktasında $\pm 0,478$ m olarak elde edilmiştir.

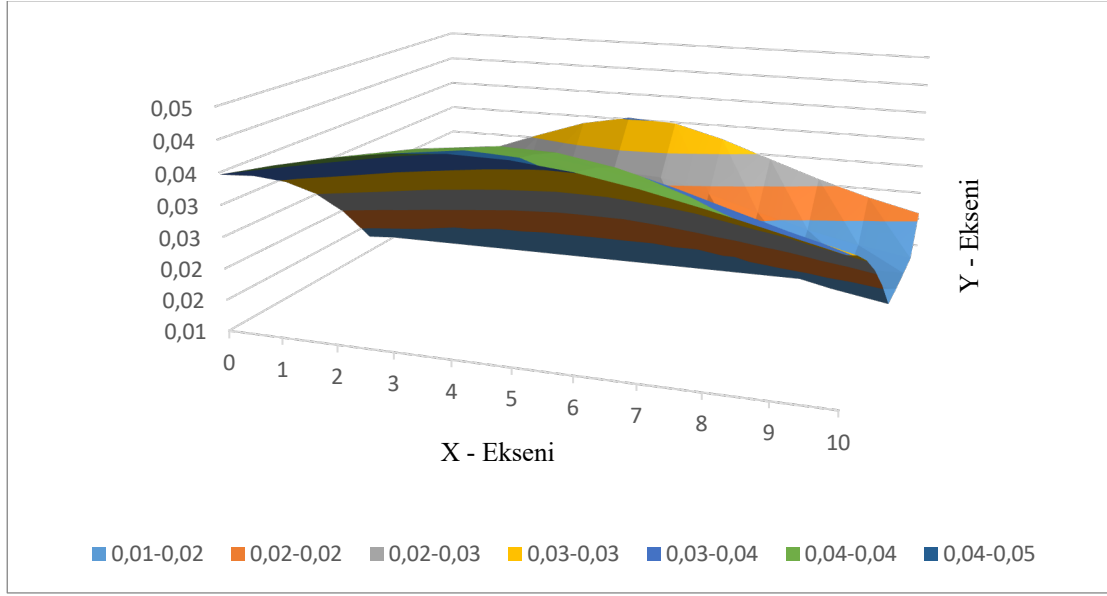


Şekil 7. Hata yayılma kanunu ile elde edilen konumlandırma belirsizliği.

Tablo 2. Hesaplanan Konum Hatalarının Tablo Halinde Gösterimi.

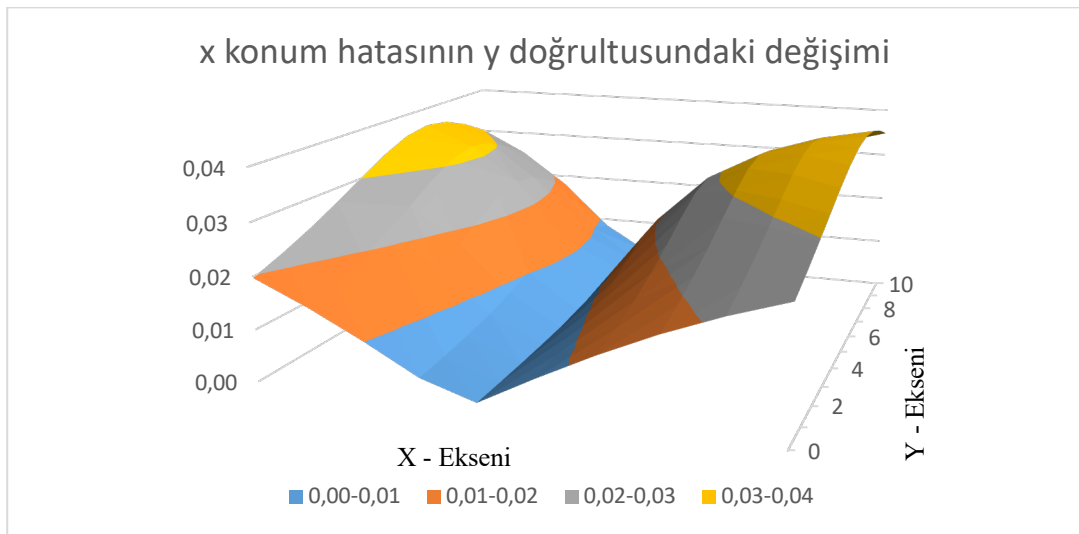
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,418	0,392	0,372	0,360	0,355	0,358	0,370	0,388	0,413	0,443	0,478
1	0,380	0,351	0,329	0,315	0,309	0,313	0,326	0,347	0,375	0,408	0,445
2	0,346	0,315	0,290	0,273	0,267	0,272	0,286	0,310	0,341	0,377	0,417
3	0,319	0,284	0,256	0,237	0,230	0,235	0,252	0,279	0,312	0,351	0,394
4	0,298	0,261	0,230	0,209	0,200	0,206	0,226	0,255	0,291	0,333	0,377
5	0,286	0,247	0,214	0,192	0,183	0,189	0,210	0,241	0,279	0,322	0,368
6	0,285	0,245	0,212	0,189	0,180	0,186	0,207	0,239	0,278	0,321	0,367
7	0,293	0,255	0,223	0,201	0,193	0,199	0,219	0,249	0,286	0,328	0,373
8	0,311	0,275	0,246	0,226	0,219	0,224	0,242	0,270	0,304	0,344	0,387
9	0,336	0,304	0,278	0,260	0,254	0,258	0,274	0,299	0,330	0,367	0,408
10	0,368	0,338	0,315	0,300	0,295	0,299	0,312	0,334	0,363	0,397	0,435

Şekil 5-7’de sunulan konumlandırma hatası yüzeyleri konum hatasının ve konum hatası değişimlerinin mekân içerisinde önemli farklılıklar gösterebildiği sonucunu vermiştir. Konumlandırma hatasının mekân içerisindeki değişimini incelemek için konumlandırmanın x ve y koordinatlarında ölçülen hata değerlerinin hem x hem de y doğrultusu üzerinde ardışık komşuluklarına göre farkları alınmıştır. Elde edilen eğriler Şekil 8 – 12’de sunulmuştur.

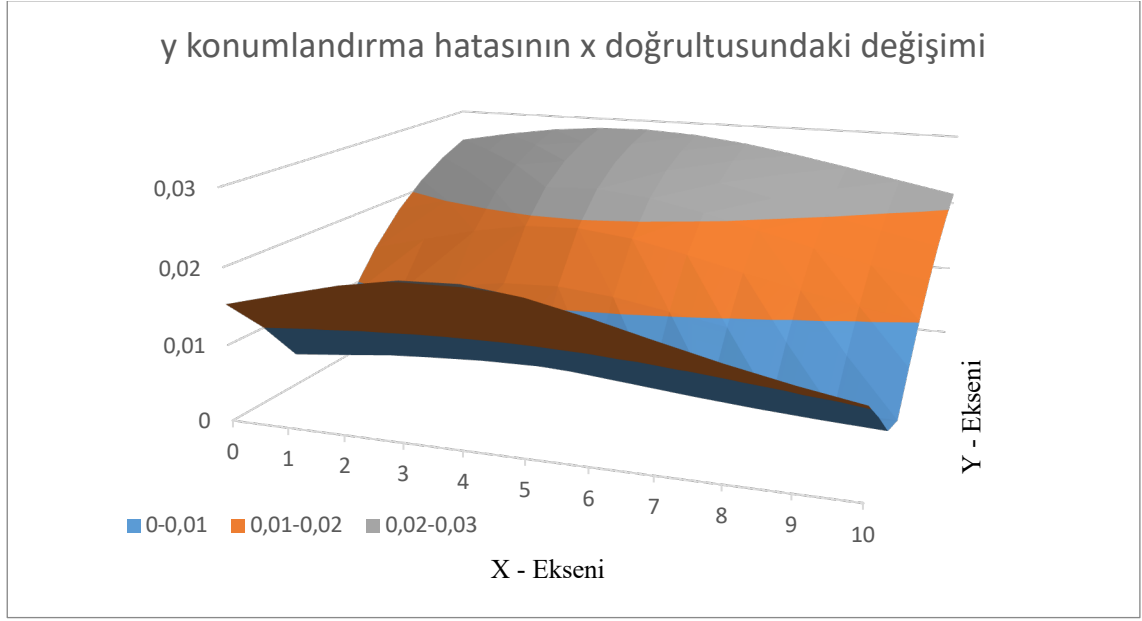


Şekil 8. Konumlandırmanın x koordinatı belirsizliğinin x doğrultusundaki değişimi.

Şekil 8’de sunulan hata eğrisi Şekil 5’te sunulan x koordinatı konumlandırma hatasından x koordinatı boyunca ardışık biçimde bir önceki hücreden çıkarılarak elde edilmiştir. Bu nedenle konumlandırma hatası x eksenini boyunca 11 noktada hesaplanırken hata fark değerleri x eksenini boyunca 10 noktada hesaplanabilmiştir. Şekil 9’da sunulan hata eğrisi Şekil 5’te sunulan x koordinatı konumlandırma hatasından y koordinatı boyunca ardışık biçimde bir önceki hücreden çıkarılarak elde edilmiştir. Bu nedenle konumlandırma hatası y eksenini boyunca 11 noktada hesaplanırken hata fark değerleri y eksenini boyunca 10 noktada hesaplanabilmiştir. x koordinatı konumlandırma hatasının hem x hem de y konumu için odanın merkezine yakın bölgelerde birim mesafede daha az değiştiği kenarlara gidildikçe hata miktarındaki değişimin arttığı görülmektedir. Belirtilen hata eğrileri incelendiğinde odanın merkezinde x doğrultusu boyunca uzanan bir elemanın boyutu başlangıç ve bitiş noktalarından ölçülen iki konumun farkı ile hesaplandığında düşük bir hata değeri beklenirken aynı cismin odanın kenarında bulunması halinde çok daha yüksek bir hata değeri beklenmektedir. Cismin y doğrultusu boyunca uzandığı ve cismin odanın merkezine yakın olduğu durum için hata miktarının daha düşük oda kenarlarına yakın olduğu durumda ise daha yüksek hata değeri beklenmektedir.

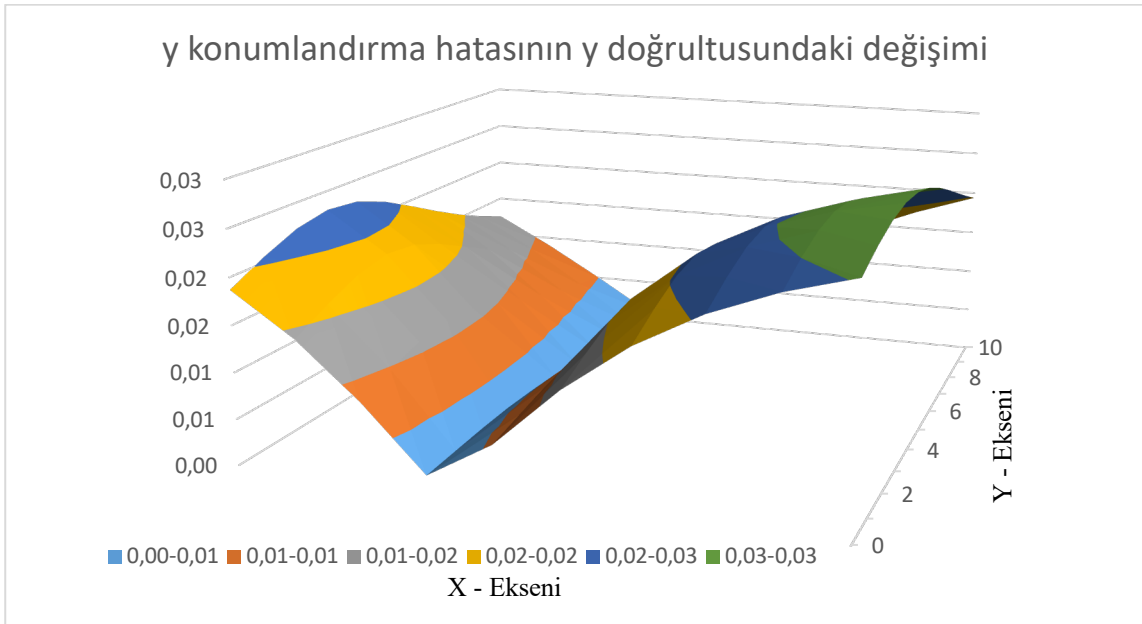


Şekil 9. x konumlandırma hatasının y doğrultusundaki değişimi.



Şekil 10. y konumlandırma hatasının x doğrultusundaki değişimi.

Şekil 10 ve 11’de sunulan hata eğrileri Şekil 6’da sunulan y koordinatı konumlandırma hatasından sırasıyla x ve y koordinatları boyunca ardışık biçimde bir önceki hücreden çıkarılarak Şekil 8 ve 9’da sunulan eğrilere benzer şekilde elde edilmiştir. y koordinatı konumlandırma hatasının hem x hem de y konumu için odanın merkezine yakın bölgelerde birim mesafede daha az değiştiği kenarlara yaklaştıkça hata miktarındaki değişimin arttığı görülmektedir. Belirtilen hata eğrileri incelendiğinde odanın merkezinde y doğrultusu boyunca uzanan bir elemanın boyutu başlangıç ve bitiş noktalarından ölçülen iki konumun farkı ile hesaplandığında düşük bir hata değeri beklenirken aynı cismin odanın kenarında bulunması halinde çok daha yüksek bir hata değeri beklenmektedir. Cismin x doğrultusu boyunca uzandığı ve cismin odanın merkezine yakın olduğu durum için hata miktarının daha düşük oda kenarlarına yakın olduğu durumda ise daha yüksek hata değeri beklenmektedir.



Şekil 11. y konumlandırma hatasının y doğrultusundaki değişimi.

6. Tartışma

Üçgenleme tekniği ile elde edilen konum değerinin hassasiyeti bu çalışmada hata yayılma kanunu ile tahmin edilmiştir. Girdi parametrelerinin belirsizlikleri olarak istasyon noktalarının konum belirsizliği ile istasyon ile gezici arasında ölçülen mesafelerin hata miktarları alınmıştır. Bir oda içinde düzenli aralıklarda belirlenen gezici konumuna göre oluşan ölçme geometrisine göre üçgenleme tekniği denklemlerinin girdi parametrelerine göre kısmi türevleri hesaplanarak hata yayılma kanunu ile konumlama hassasiyeti tahmin edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda ölçülen konumun hem x hem de y doğrultusuna göre hata miktarının sabit kalmadığı ve oda konumuna göre değişiklik gösterdiği belirlenmiştir.

Odanın orta bölgesinde istasyon noktalarının ağırlık merkezinde bulunduğu en düşük hata miktarının elde edildiği, bir istasyondan uzaklaşıldığında ise Şekil 6-7’de gösterildiği üzere hata miktarının arttığı görülmüştür. Bu durum konumlandırma hatasının mekân içerisinde sabit kalmadığını göstermektedir. Hata miktarının değişken olması özellikle duvar konumu ve kalınlığı, kolon dışlarının büyüklüğünü ölçmede önemli sorun oluşturmaktadır. Konum hatası büyüklüğünün ne kadar değiştiği ardışık ölçüm noktalarında beklenen hataların farkları alınarak hesaplanmış ve Şekil 8-11’de gösterildiği gibi hata farklarının rastgele olmayacak biçimde değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Mekânın merkezinden dışa doğru gidildikçe hatanın birikecek şekilde yükseldiği ve mekânın sınır bölgesinde birim konum değişiminde görülen hata artışının en yüksek düzeye ulaştığı görülmüştür. Belirtilen çıkarım üçgenleme tekniği ile rölöve hazırlanması halinde dış çevrede bulunan kolon dışı, pencere boyutu, bölme duvar ve diğer yapısal ve mimari elemanların boyutlarında ve yönelimlerindeki hata miktarının odanın merkezinde bulunan elemanlardan daha fazla olması beklenmektedir. Rölöve çalışmalarında işaretlenecek elemanların ağırlıklı olarak mekânın dış çevresinde bulunacağı dikkate alındığında en yüksek birim hata ile konumlandırmanın yapıldığı bölgeye denk geldikleri görülecektir. Belirtilen sorunun aşılabilmesi için ilave istasyon noktaları eklenerek hatanın dengelenmesiyle konum hatasındaki değişkenlik azaltılabilir. Ayrıca yapısal ve mimari elemanların boyut ve konumlarının belirlenmesinde ilgili elemanın diyagonal uçları arasındaki hata büyüklüğü farkı hata yayılma kanunu ile tahmin edilerek elemanın özniteliklerini de dikkate alacak şekilde sınıflandırarak rölöve çalışmasının doğruluğu iyileştirilebilecektir.

Hassas mesafe ölçme teknikleri uygulansa dahi üçgenleme ile elde edilecek konumun hata düzeyinin yaklaşık 20 cm değişkenlik gösterebileceği analizler sonucunda belirlenmiştir. Bunun sonucunda yapısal ve mimari elemanların konumlarında 20 cm mertebesinde kayma olabileceği gibi eleman uzunluklarının da hatalı ölçülebileceği değerlendirilmektedir. Bu durumda oda boyutlarının mesafe ölçümü ile belirlenip konumlandırma ile elde edilecek oda boyutları arasındaki tutarsızlık doğrusal düzeltme ile giderilebilir. Elde edilen kapanma hatası değerine hata yayılma kanunu sonucu elde edilen hata tahminine göre yapısal ve mimari elemanların konumlarına düzeltme ağırlığı uygulanarak rölövenin doğruluğu iyileştirilebilecektir.

Projesi olmayan bir binada yüksek doğrulukta rölöve hazırlanması için yapılan ölçümlerin hassas olması gerekir. Bu nedenle kullanılacak iç mekân konumlandırma teknolojisinin seçimi oldukça önemlidir. Altyapısının yaygın olması nedeniyle iç mekân konumlandırmada sıklıkla kullanılan WiFi teknolojisi, sinyallerin duvardan geçerken zayıflaması ve konum hata oranının yüksek olması nedeniyle rölöve için uygun değildir. Kızılötesi ve ZigBee teknolojileri ortamdaki engellerden önemli ölçüde etkilenir ve hata oranları yüksektir. Kısa menzile sahip bu teknolojiler de hassas ölçümler gerektiren rölöve için uygun değildir. Bluetooth, BLE, RFID teknolojileri düşük enerji tüketimi ve geniş kapsama alanı avantajlarına sahip olsalar da konumlandırma hatalarının yüksek olması nedeniyle rölöve için uygun değildir. Geniş kapsama alanı, ölçeklenebilir olması ve hata oranının düşük olması nedeniyle rölöve hazırlamak için en uygun teknoloji sonar mesafe ölçümleri ile desteklenmiş UWB teknolojisi olabileceği yapılan analizler neticesinde değerlendirilmektedir.

Çalışmada alıcı ve istasyon mesafeleri arasındaki mesafe hataları WiFi, RFID, bluetooth ve ZigBee teknikleri ile elde edilebilecek mesafelere göre daha yüksek hassasiyette kızılötesi, ultrason ve UWB tekniklerinden ise daha düşük hassasiyette simüle edilmiştir. Literatürde tanımlanan hata değerleri ile karşılaştırıldığında simülasyon sonuçlarının WiFi, RFID, bluetooth ve ZigBee tekniklerinden daha iyi kızılötesi, ultrason ve UWB tekniklerinde daha düşük hassasiyette konum hataları elde edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde simülasyonun tutarlı sonuçlar verdiği görülecektir. Bununla birlikte literatürde üçgenleme tekniği ile konum belirlemenin konuma göre hata değerinin nasıl değişebileceğinin araştırılmadığı görülmüştür. Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde istasyon noktalarının dağılımına bağlı olarak istasyon noktalarının ağırlık merkezinde en yüksek hassasiyette konumlandırmanın yapıldığı ağırlık merkezinden uzaklaşıldıkça konumlandırma hatasının arttığı belirlenmiştir.

7. Sonuç

Bu çalışmada hata yayılma kanunu ile üçgenleme yöntemi ile elde edilecek konum bilgisinin hassasiyeti incelenmiştir. Konum hassasiyetinin mekân içerisinde sabit kalmadığı, istasyonlardan uzaklaştıkça konumlandırma hassasiyetinin azaldığı yapılan vaka çalışması ile belirlenmiştir. Ayrıca üçgenleme denklemlerinin istasyon noktaları ve ölçüm mesafelerine göre alınan kısmi türev denklemleri sunulmuş ve bu alanda analitik çalışma yapacak araştırmacıların kullanımına sunulmuştur. Hassas mesafe ölçümü sağlayan alıcılar kullanılsa dahi üçgenleme ile yeterli ve tutarlı konum hassasiyetinin elde edilemeyeceği ve fazladan istasyon noktalarının kurularak multilaterasyon tekniği ile konumlandırma hassasiyetinin iyileştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Afet bölgesinde hasarlı binalarda ölçüm için çok sayıda istasyon kurulması bina içinde daha fazla süre kalınması anlamına geldiği için yeterli konum hassasiyetini sağlayan en az istasyon sayısı ve yerleşiminin belirlenmesinin ileri çalışma olarak gerçekleşmesi bu çalışmanın eksikliklerini tamamlayacaktır. Çalışmanın literatüre katkısı hata yayılma kanunu ile üçgenleme yönteminin hata analizinin yapılmasıdır.

Kaynaklar

- [1] Alışkan İ, Şahin A. Ultra Geniş Bant Teknolojisi ile Kapalı Alanlarda Konum Belirleme. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi* 2023; 13(1): 179-190.
- [2] Shang Z, Wang L. Overview of WiFi fingerprinting based indoor positioning. *IET Communications* 2022; 16(7): 725-733.
- [3] Jang B, Kim H, Wook Kim, J. Survey of landmark-based indoor positioning Technologies. *Inf Fusion* 2023; 89: 166-188.
- [4] Farid Z, Nordin R, Ismail M. Recent advances in wireless indoor localization techniques and system. *J Comput Networ Comm* 2013(1):1-12.
- [5] Fox D, Hightower J, Kauz H, Liao L, Patterson D. Bayesian techniques for location estimation. In *Proceedings of the 2003 workshop on location-aware computing*; 12-13 October 2003; Seattle, Washington, USA; pp. 16-18.
- [6] Zhang D, Xia F, Yang Z, Yao C, Zhao W. Localization technologies for indoor human tracking. In *2010 5th international conference on future information technology*; 21-23 May 2010; Busan, Korea (South); IEEE. pp. 1-6.
- [7] Yaman Z, Gündoğdu K, Çalhan A. Yeni Bir İç Mekân Konum Bulma Sistemi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2021; 9(2): 636-645.
- [8] Tunca C, Toplan E, Işık S, Ersoy C. Yapay sinir ağları ile wifi tabanlı iç mekan konumlandırma. 16. Akademik Bilişim Konferansı; 5-7 Şubat 2014; Mersin, Türkiye. pp. 665-670.
- [9] Akleylek S, Kılıç E, Söylemez B, Aruk TE, Çavuş A. Kapalı mekân konumlandırma üzerine bir çalışma. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 2020; 8(5): 90-105.
- [10] Liu F, Liu J, Yin Y, Wang W, Hu D, Chen P, Niu Q. Survey on WiFi-based indoor positioning techniques. *IET communications* 2020; 14(9): 1372-1383.
- [11] Mrindoko NR, Minga LM. A comparison review of indoor positioning techniques. *IJC* 2016; 21(1): 42-49.
- [12] Silvia Z, Martina C, Fabio S, Alessandro P. Ultra wide band indoor positioning system: Analysis and testing of an IPS technology. *IFAC-PapersOnLine* 2018; 51(11): 1488-1492.
- [13] Alarifi A, Al-Salman A, Alsaleh M, Alnafessah A, Al-Hadhrami S, Al-Ammar MA, Al-Khalifa HS. Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances. *Sensors* 2016; 16(5): 707.
- [14] Dabove P, Di Pietra V, Piras M, Jabbar AA, Kazim SA. Indoor positioning using Ultra-wide band (UWB) technologies: Positioning accuracies and sensors' performances. *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*; 23-26 April 2018; Monterey, CA, USA: IEEE. pp. 175-184.
- [15] Ijaz F, Yang HK, Ahmad AW, Lee C. Indoor positioning: A review of indoor ultrasonic positioning systems. *15th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT)*; 27-30 Jan 2013; IEEE. pp. 1146-1150
- [16] Kunhoth J, Karkar A, Al-Maadeed S, Al-Ali A. Indoor positioning and wayfinding systems: a survey. *HCIS* 2020; 10(1): 1-41.
- [17] Tunç M, Kara F, Kaya H. Dinamik Yapay Sinir Ağı ile İç Mekân Konum Kestirimi. *El-Cezeri* 2020; 7(2): 858-870.
- [18] Üstebay S, Gümüş E, Aydın MA, Sertbaş A. İç mekân konum tespitinde sinyal haritasının küçültülmesi ve performans analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2017; 32(4): 1131-1142.
- [19] Akçura N, Uyar E, Candan M, Yavuz E. Çevre Haritalandırma ve Obje Geçme Algoritması Entegreli Bir Mobil Aracın Bulanık Mantık ile İç Mekan Navigasyon Kontrolü. *Ulusal Otomatik Kontrol Konferansı (TOK)*; 11-13 Eylül 2014; pp. 563-566.
- [20] Soltanaghaei E, Kalyanaraman A, Whitehouse K. Multipath triangulation: Decimeter-level wifi localization and orientation with a single unaided receiver. *16th annual international conference on mobile systems, applications, and services*; 10-15 June 2018; Munich Germany: pp. 376-388.
- [21] Jekabsons G, Kairish V, Zuravlyov V. An Analysis of Wi-Fi Based Indoor Positioning Accuracy. *Computer Science* 2011; 47: 1407-7493
- [22] Chen C, Chen Y, Han Y, Lai HQ, Liu KR. Achieving centimeter-accuracy indoor localization on WiFi platforms: A frequency hopping approach. *IEEE Internet of Things Journal* 2016; 4(1): 111-121.

- [23] Chen C, Chen Y, Han Y, Lai HQ, Zhang F, Liu KR. Achieving centimeter-accuracy indoor localization on WiFi platforms: A multi-antenna approach. *IEEE Internet of Things Journal* 2016; 4(1), 122-134.
- [24] Qian K, Wu C, Yang Z, Liu Y, Jamieson K. Widar: Decimeter-level passive tracking via velocity monitoring with commodity Wi-Fi". 18th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Chennai India July 10 - 14, 2017 pp. 1-10.
- [25] Vleugels R, Van Herbruggen B, Fontaine J, De Poorter E. Ultra-wideband indoor positioning and IMU-based activity recognition for ice hockey analytics. *Sensors*, 2021; 21(14): 1-19.
- [26] Bettemir ÖH. Prediction of georeferencing precision of pushbroom scanner images. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2011; 50(3); 831-838.
- [27] Bettemir ÖH. Sensitivity and error analysis of a differential rectification method for CCD frame cameras and pushbroom scanners. Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2006.