

Düşük Maliyetli GNSS ve IMU Verilerinin Entegrasyonu: Uygulama Örneği

Integration of Low-Cost GNSS and IMU Data: A Case Study

Ramazan Alper KUÇAK ¹, Aysan Şahin ¹

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), İnşaat Fakültesi, 34469 Maslak İstanbul, TÜRKİYE*

Öz

Günümüz teknolojik gelişmeleri, konum belirleme sistemlerinin mühendislik uygulamaları ve disiplinler arası alanlardaki kritik rolünü vurgulamaktadır. Light Detection and Ranging (LiDAR), Inertial Measurement Unit (IMU) ve Global Navigation Satellite System (GNSS) tabanlı sistemler, geomatik mühendisliği, akıllı şehir uygulamaları, insansız hava araçları, otonom araçlar ve robotik sistemler gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, yüksek hassasiyet gereksinimleri ve bütçe kısıtları, düşük maliyetli sistemlerin yeterli doğrulukla veri sağlayamaması nedeniyle kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu, maliyet etkin bir çözüm sunarken doğruluğun artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu çalışma, iPhone 13 Pro cihazından elde edilen GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu ile İstanbul'un Bebek semtinde yaklaşık 330 metrelik bir yürüyüş rotası boyunca bir yol haritası oluşturulmasını incelemiştir. MATLAB ortamında gerçekleştirilen analizde, önce Butterworth ve Kalman filtreleme teknikleri uygulanarak veriler işlenmiş, GNSS verilerine %95, IMU verilerine %5 ağırlık verilerek sapmalar minimize edilmiştir. Kalman filtresinin parametreleri optimize edilerek daha doğru sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra, GNSS ağırlığı %98'e çıkarılıp IMU ağırlığı %2'ye düşürülerek farklı bir senaryo uygulanmış, böylece entegre verilerin doğruluğu artırılmıştır. Bu süreçte, GNSS verilerinin yüksek hassasiyeti ile IMU'nun sinyal kaybı durumlarındaki katkısı optimize edilmiştir. Çalışma, düşük maliyetli cihazlardan elde edilen GNSS ve IMU verilerinin uygun algoritmalarla işlenmesiyle yüksek doğrulukta konum belirleme sağlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu çalışma iPhone 13 Pro ile elde edilen GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi açısından ilk defa uygulanmasının yanı sıra, iPhone 13 Pro GNSS verilerine herhangi bir ek anten ya da post-process işlemi ile doğruluk artırma çalışması yapılmadan iki verinin birleştirilmesi açısından literatüre yenilikler katmaktadır. Bu yöntem, düşük bütçeli projeler için maliyet etkin çözümler sunarak mühendislik projelerine önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: GNSS, IMU, Butterworth Filtresi, Kalman Filtresi, iPhone 13 Pro, Düşük Maliyetli Sistemler

Abstract

Today's technological advancements highlight the critical role of positioning systems in engineering applications and interdisciplinary fields. Light Detection and Ranging (LiDAR), Inertial Measurement Unit (IMU), and Global Navigation Satellite System (GNSS)-based systems are widely used in areas such as geomatics engineering, smart city applications, unmanned aerial vehicles, autonomous vehicles, and robotic systems. However, high accuracy requirements and budget constraints make the use of low-cost systems challenging. In this context, the integration of GNSS and IMU data provides a cost-effective solution while contributing to the improvement of positioning accuracy. This study examines the creation of a route map using the integration of GNSS and IMU data obtained from an iPhone 13 Pro device during a walking route of approximately 330 meters in Istanbul's Bebek district. In the MATLAB environment, data were first processed using Butterworth and Kalman filtering techniques, with weights assigned as 95% to GNSS data and 5% to IMU data, minimizing deviations. The parameters of the Kalman filter were optimized to achieve more accurate results. Subsequently, a different scenario was applied by increasing the GNSS weight to 98% and decreasing the IMU weight to 2%, thereby enhancing the accuracy of the integrated data. This process optimized the high accuracy of GNSS data and the contribution of IMU data during signal loss situations. The study demonstrates that high-accuracy positioning can be achieved by processing GNSS and IMU data obtained from low-cost devices with appropriate algorithms. Moreover, this study contributes to the literature by being the first to combine GNSS and IMU data obtained from the iPhone 13 Pro. Additionally, it introduces innovations by integrating the two datasets without any external antenna or post-processing applied to enhance the accuracy of the iPhone 13 Pro GNSS data. This method offers cost-effective solutions for low-budget projects, providing significant contributions to engineering applications.

Keywords: GNSS, IMU, Butterworth Filter, Kalman Filter, iPhone 13 Pro, Low-Cost Systems

I. GİRİŞ

Günümüz teknolojik gelişmeleri, konum belirleme teknolojilerinin mühendislik uygulamalarındaki vazgeçilmez rolünü giderek daha belirgin hale getirmektedir. Geomatik mühendisliği başta olmak üzere, akıllı şehir planlaması, yol haritalarının oluşturulması, insansız hava araçlarıyla gerçekleştirilen veri toplama işlemleri, Light Detection and Ranging (LiDAR) teknolojisi, otonom araç sistemleri ve robotik uygulamalar gibi geniş bir alanda Global Navigation Satellite System (GNSS) ve Inertial Measurement Unit (IMU) tabanlı sistemler yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, hassas konum belirleme ihtiyaçlarını karşılamak üzere geliştirilen yenilikçi yaklaşımların temelini oluşturmakta ve disiplinler arası uygulamalarda kritik bir öneme sahiptir.

GNSS teknolojisinin temelleri 1957 yılında atılmıştır. Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı, 1978 yılında Global Positioning System (GPS) için ilk test uydusunu fırlatmış ve bu sistemin tam anlamıyla operasyonel hale gelmesi 1995 yılında mümkün olmuştur. 1980'li yılların ortasında, GPS alıcılarının ölçüm işlemlerinde kullanımı Orman Hizmetleri tarafından başlatılmıştır. Ancak bu dönemde kullanılan GPS cihazları oldukça pahalı, büyük ve ağır olmasının yanı sıra, yüksek enerji tüketimi nedeniyle ciddi miktarda pil gücüne ihtiyaç duymaktaydı [1].

GPS ve dahili haritalara sahip ilk ticari cep telefonu 1999 yılında tanıtılmıştır [2]. 2007'den itibaren akıllı telefonlarda GPS teknolojisinin kullanımı hızla artmış ve 2009 yılına kadar standart hale gelmiştir [3, 4]. Düşük maliyetli GNSS çipleri metre düzeyinde doğruluk sağlarken, pahalı ekipmanlar çoklu frekans sinyalleriyle santimetre hassasiyetine ulaşabilmektedir. Teknolojik gelişmeler, GNSS alıcıları ve antenlerin performansını artırmış, pil ömrünün uzamasıyla birlikte akıllı telefonlarda daha fazla uygulama imkânı sağlamıştır. Akıllı telefonlar, yüksek kaliteli jeodezik cihazların doğruluğunu tam olarak karşılayamasa da, alınan sinyallerdeki çoklu yol hatalarını düzeltebilen yazılımlarla desteklendiğinde performansları bu cihazlara oldukça yaklaşmaktadır [5].

Akıllı telefonların GPS/GNSS doğruluğu, veri toplama sırasında sinyalleri etkileyen çevresel faktörler, uydu konumları, donanım özellikleri ve yazılım değişkenlerine bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte, akıllı telefonlar, düşük maliyetli bir alternatif olarak konumlandırmada gelişmiş doğruluk sağlayabilme potansiyeline sahiptir [6, 7, 8].

IMU'nun tarihi, 1930'larda uçak navigasyonunda ve büyük cihazlarda kullanılmaya başlanmasıyla ortaya çıkmıştır [9]. Ancak, o dönemde boyut, maliyet ve güç tüketimi gibi kısıtlamalar nedeniyle bu teknoloji yalnızca büyük ölçekli uygulamalarda sınırlı kalmıştır. Son yıllarda, düşük maliyetli, kompakt ve düşük işlem

gücü gerektiren mikro-elektromekanik sistem (Micro-Electro-Mechanical System - MEMS) IMU'ların geliştirilmesiyle birlikte, bu cihazların kullanım alanları önemli ölçüde genişlemiş ve talep hızla artmıştır [10]. Küçük elektronik cihazların taşınmasının yaygınlaşması, pozisyon sensörlerine olan talebi önemli ölçüde artırmıştır. Bu sensörler, canlı konum belirleme ve üçüncü taraflara güncelleme sağlama gibi gereksinimlere yanıt vermektedir. IMU'lar, hızlanma, açısal hız ve dönme hareketlerini ölçme yetenekleriyle geniş bir uygulama alanı sunmaktadır [11, 12].

GNSS sistemleri, yol navigasyonu gibi zorlu gereksinimlerin karşılanmasında öne çıkan bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Ancak, GNSS sinyalleri, kentsel kanyonlar, kapalı otoparklar ve yeraltı beton tüneller gibi sinyal alımının zor olduğu bölgelerde zayıflama, yansıma veya engellenme gibi sorunlarla karşılaşabilmektedir [13]. Bu tür sorunları azaltmak amacıyla, yardımcı teknolojilerin kullanımı bağımsız GNSS çözümlerinin sınırlamalarını gidererek erişilebilirlik ve doğruluk düzeylerini artırmaktadır. Özellikle GNSS ve IMU sensörlerinden elde edilen ölçümlerin birleştirilmesiyle, yüksek bant genişliğine sahip bir navigasyon çözümü sunmak için ticari entegrasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu entegrasyon sayesinde, IMU sensörlerinin kalibrasyonu sağlanmakta, ataletsel navigasyon sistemlerindeki hata büyümesi kontrol altına alınmakta ve bağımsız GNSS çözümlerine kıyasla daha yüksek doğrulukta veri çıktısı elde edilmektedir [14,15,16,17].

Konum bazlı sistemler, mobil cihazlarla elde edilen verilerin coğrafi bilgi sistemlerinde kullanılmasına olanak tanımaktadır. GNSS ve IMU verileri, hem açık alanlarda konum bilgisi elde etmekte hem de GNSS sinyal kaybı durumlarında hassas konum belirleme çalışmaları için önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Ancak, hassasiyet gereksinimleri ve maliyet kısıtlamaları, özellikle düşük bütçeli projelerde önemli bir engel oluşturmaktadır. Bu noktada, düşük maliyetli GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu, konum doğruluğunu artırarak bu tür projelerde kullanımını mümkün kılmaktadır ve aynı zamanda birçok çalışmada altlık veri olarak değerlendirilebilmektedir. Literatürde, GNSS ve IMU verilerinin birleştirildiği birçok uygulama vardır. Fakat bunlar GNSS verilerinin post-process işlemi veya farklı bir anten tipi ile sinyal gücü artırılarak doğruluğu artırılmış verileri direkt olarak kullanıldığı çalışmalardır. Örneğin, iPhone 13 Pro GNSS verisinin doğruluğunu, viDoc RTK GNSS ile artırmıştır [18]. Buna benzer birçok çalışma için örnek verilebilir. Ancak, bu çalışma iPhone 13 Pro ile elde edilen GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi açısından ilk defa uygulanmasının yanı sıra, iPhone 13 Pro GNSS verilerine herhangi bir ek anten ya da post-process işlemi ile doğruluk artırma çalışması yapılmadan iki verinin birleştirilmesi açısından literatüre yenilikler katmaktadır.

Bu çalışma, Bebek bölgesinde gerçekleştirilen bir yürüyüş esnasında iPhone 13 Pro GNSS ve IMU verilerinin kaydedilmesi, bu verilerin MATLAB ortamında kalman filtrelemesi ile işlenmesi ve entegre edilmesi yoluyla yol haritaları oluşturmayı amaçlamaktadır. GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu sayesinde konum bilgilerindeki hata payı azaltılmakta ve daha hassas bir konum belirleme sağlanmaktadır. Bu durum hem teorik hem de pratik uygulamalar için önemli katkılar sunmanın yanı sıra; düşük maliyetli sensörlerden elde edilen GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi ile konum doğruluğunun artırılması uygulamalarına önemli katkılar sunmaktadır.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. GNSS ve IMU Sistemleri

GNSS tabanlı konumlandırma, pek çok navigasyon uygulamasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. GNSS alıcıları, uydulardan alınan mesafe ölçümleri ile güvenilir bir üç boyutlu konumlandırma çözümü sunabilmektedir. Ancak, GNSS tabanlı konumlandırma, özellikle araçların şehir kanyonlarında [19], tünel içinde hareket ettikleri durumlarda ya da GNSS sinyalinin sahte sinyal üretimi [20] veya sinyal engelleme (jamming) saldırılarıyla karşılaştığı hallerde kullanılamaz hale gelebilir. Bunun yanı sıra, GNSS mesafe ölçümlerinin kalitesi, çoklu yol etkisi veya iyonosferik aktivite [21] gibi dış etkenlerle de olumsuz bir şekilde etkilenebilir. Buna karşılık, İvmeölçer Birimi (IMU) ölçümleri, dış çevresel faktörlerden daha az etkilenebilir. Bu nedenle, IMU ve GNSS alıcısının entegre edildiği navigasyon sistemleri, genellikle sürekli, güvenilir ve yüksek bant genişliğine sahip bir navigasyon çözümü sağlamak için tercih edilmektedir [22].

İki temel GNSS sistemi NAVSTAR GPS ve GLONASS'dir. En kötü şartlarda, Global Positioning System (GPS) için rapor edilen doğruluk yaklaşık 7,5 metre iken Rusya'ya ait konumlandırma sistemi olan GLONASS için bu durum 10 metre olarak rapor edilmiştir. Tabi bu durum alıcı antenin tipine, hava şartlarına, GNSS' in bulunduğu konuma göre değişiklikler gösterebilir. Üreticiler genellikle düşük maliyetli alıcılar kullanma eğilimindedir, çünkü hassasiyet eksikliği, harita eşleme teknikleri veya daha kesin bir konum elde etmek için ağ verileri kullanılarak hassas hale getirilebilir. Ancak, bu teknikler, kullanıcı post-processing çözümünü veya uzak bölgelerde olduğu gibi ağ bağlantısının mümkün olmadığı koşullarda etkili olmayabilir. GNSS alıcısı ve IMU aracılığıyla elde edilen ham konum verilerine (enlem ve boylam) dayanarak, pahalı GNSS alıcılarına bir sayısal alternatif oluşturabilmek için, GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu, Butterworth filtresi ve Kalman filtresi gibi filtreleme yöntemleriyle

iyileştirilebilmektedir. Butterworth filtresi, yüksek frekanslı gürültüyü azaltmak amacıyla kullanılırken, Kalman filtresi, verilerin doğruluğunu artırmak için IMU ve GNSS verilerini birleştirerek daha hassas konum tahminleri elde edilmesini sağlayabilmektedir. Bu filtreleme yöntemleri sayesinde, GNSS ve IMU entegrasyonu daha güvenilir ve doğru bir hale getirilmiştir [23].

2.2. Butterworth Filtresi ile Ön İşleme

Butterworth filtresi, geçiş bandında mümkün olduğunca düz bir frekans yanıtı sağlayacak şekilde tasarlanmış bir sinyal işleme filtresi türüdür. Bu filtre, ilk kez 1930 yılında Britanyalı mühendis ve fizikçi Stephen Butterworth tarafından "On the Theory of Filter Amplifiers" başlıklı makalesinde tanımlanmıştır [24]. Butterworth filtreleri, hareket analizi ve benzeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılan dijital filtrelerden biridir. Hızlı ve basit yapısıyla, birçok uygulama için yeterli performans sağlamakta ve bu da Butterworth filtresinin radyo frekansı (RF) ve sesli aktif filtreler gibi elektronik alanlarda geniş bir kullanım alanı bulmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, frekansa dayalı olmaları nedeniyle filtrelemenin etkisi kolayca anlaşılabilir ve tahmin edilebilir [25,26].

2.3. Kalman Filtresi ile Veri Entegrasyonu

Kalman filtreleme tekniği, 1960 yılında Rudolf Emil Kalman tarafından geliştirilen ve günümüzde de mühendislik ve istatistik gibi birçok alanda geniş bir kullanım alanına sahip bir yöntemdir. Bu yöntem, doğrusal bir sistemdeki gürültülü ve normal dağılım gösteren veriler üzerinden en iyi kestirimi sağlar ve bu kestirimleri gerçek zamanlı olarak gerçekleştirebilir [27]. Kalman filtresi, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda diğer tahmin yöntemlerine kıyasla üstün performans göstermesiyle dikkat çeker [28].

Kalman filtresinin temel matematiksel yapısı, sistemin dinamiğini ve ölçüm sürecini tanımlayan iki ana bileşene ayrılmaktadır [29]. Sürekli zamanlı Kalman filtresinde, sistem dinamiği, n. dereceden doğrusal diferansiyel denklemlerle ifade edilir [30];

$$\dot{x} = Fx + w = \frac{\partial^n x}{\partial t^n} \quad (1)$$

Bu diferansiyel eşitlik bir $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ Aralığı için tanımlandığında, kesikli Kalman Filtresi için dinamik model;

$$x_k = Ax_k - 1 + w_k \quad (2)$$

Ölçme modeli ise,

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (3)$$

Eşitliği ile ifade edilmektedir [27][30]. Burada geçen terimler ise;

$\hat{x}$: Sürekli Kalman Filtresinde durum vektörü

F: Sürekli Kalman Filtresinde diferansiyel denklemin katsayılar matrisi

x_k : Kesikli Kalman Filtresindeki t_k anındaki durum vektörü

x_{k-1} : Kesikli Kalman Filtresindeki t_{k-1} anındaki durum vektörü

A : Kesikli Kalman Filtresindeki t_{k-1} anından t_k anına geçiş matrisi

w_k : Dinamik modele ait gürültü vektörü

z_k : t_k anındaki ölçü vektörü

H : Ölçme modeline ait tasarım matrisi

v_k : Ölçülere ait gürültü vektörü

Temsil etmektedir.

Filtreleme aşaması, en küçük kareler yöntemiyle gerçekleştirilen dengeleme işlemiyle benzerlik gösterir. Ancak, klasik dengeleme yöntemlerinden en önemli farkı, yalnızca ölçüm modelinin değil, aynı zamanda bir dinamik modelin de tanımlanarak çözümün adım adım ilerlemesidir. Filtreleme, ölçüm verileri ve önceden yapılmış kestirim bilgilerini ağırlıklı bir şekilde birleştirerek, bilinmeyen durumların filtrelenmiş değerlerini hesaplar. Filtreleme denklemleri, dinamik ve ölçüm modellerinin fonksiyonel ve stokastik özelliklerini birleştirerek çözüm sürecini gerçekleştirir [29, 30].

Sonuç olarak Kalman filtre eşitlikleri sade şekli ile;

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- (I - K_k H)^T + K_k R K_k^T \quad (5)$$

Şeklinde ifade edilmektedir [26, 29].

Bu ifadede yer alan K_k , Kalman Kazancı olarak adlandırılmaktadır.

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (6)$$

Eşitliği ile gösterilmektedir ve kovaryans matrisinin (P_k) de sade olarak gösterimi;

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (7)$$

Şeklinde olmaktadır.

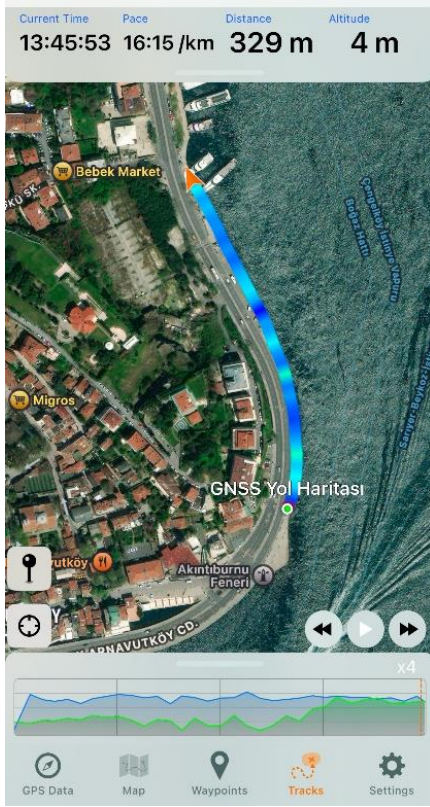
Kalman kazanç matrisi, ölçüm ve öncül kestirim arasındaki hatanın oranını belirler ve 0 ile 1 arasında bir değeri ifade eder. Kalman kazancının hesaplanmasında, dinamik durum ve ölçüm değerlerine ait rastgele hataların normal dağılım gösteren varyans-kovaryans matrisleri olan Q ve R matrisleri önemli bir rol oynar. Bu matrisler, kazanç değerinin doğru belirlenmesinde kritik bir etkiye sahiptir.

2.4. Filtre Parametrelerinin Optimizasyonu

Bu çalışma, seçilen bir pilot bölgede gerçekleştirilen bir yürüyüş esnasında düşük maliyetli (iPhone 13 Pro) GNSS ve IMU verilerinin Kalman filtrelemesi ile entegrasyonu sayesinde konum bilgilerindeki hata payının azaltılması ve daha hassas bir konum belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan uygulama, özellikle akıllı telefonlar için oldukça pratik ve maliyet açısından verimlidir, çünkü sistemde halihazırda bulunan GNSS ve IMU sensörleri sayesinde bu yöntemlerin uygulanması yalnızca telefon için üretilen basit yazılımlar ile mümkün olabilmektedir. Bu uygulama, GPS Tracks ve SensorLog uygulamaları sayesinde, iki verinin de telefondan alınması kolay bir şekilde mümkün hale gelmiştir. Ayrıca, bu uygulama iPhone 13 Pro GNSS ve IMU verilerinin birbirine entegrasyonu açısından da literatürde yapılan ilk çalışma olma özelliğinin yanında, başka alan ya da cihazlarda kullanılan düşük maliyetli GNSS ve IMU veri entegrasyonu çalışmalarına çeşitli yenilikler getirmektedir.

III. UYGULAMA

Çalışma alanı olarak, Bebek bölgesinde yaklaşık 330 metrelik bir yürüyüş esnasında GNSS ve IMU verileri kaydedilmiştir. GNSS verileri GPS Tracks uygulaması ile toplanmıştır (Şekil 1). Enlem-boylam bilgileri MATLAB'de çizilerek bir yol haritası oluşturulmuştur GNSS yol haritasını göstermektedir (Şekil 2).



Şekil 1. GPS Tracks Uygulaması ile GNSS Verilerinin Toplanması



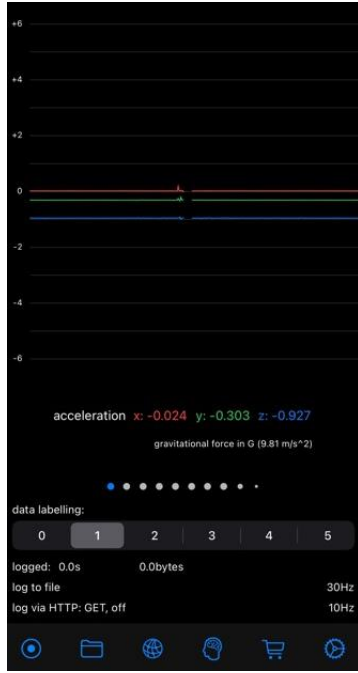
Şekil 2. GNSS Verileri ile Oluşturulan Yol Haritası

Bu çalışmada GNSS verileri GPS Tracks uygulaması ile toplanmış, IMU verileri ise SensorLog uygulaması ile kaydedilmiştir. GNSS verileri; enlem, boylam ve irtifa bilgilerini içermekte, IMU verileri ise ivme (X, Y, Z eksenlerinde) ve açısal hız ölçümlerini kapsamaktadır.

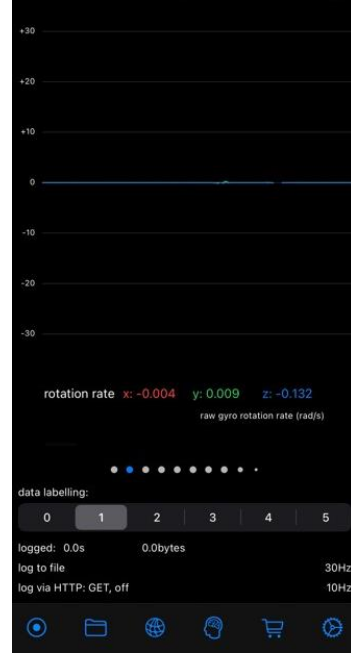
MATLAB ortamında şu adımlar izlenmiştir:

1. GNSS verilerinin yüklenmesi: GNSS verileri, CSV formatında yüklenir ve enlem, boylam, yükseklik ve zaman bilgileri alındı.
2. IMU verilerinin yüklenmesi: IMU verileri, CSV formatında yüklenir, zaman damgaları normalize edildi ve ivme verileri SI birimlerine dönüştürüldü.
3. Veri temizleme: GNSS ve IMU verilerindeki tekrar eden zaman damgaları temizlendi, veri setindeki yinelenen değerler kaldırıldı.
4. Veri filtresi: IMU verileri, yüksek frekanslı gürültüyü azaltmak amacıyla düşük frekans bileşenlerini koruyacak şekilde filtre edildi.
5. Zaman senkronizasyonu: GNSS ve IMU zaman damgaları ortak bir zaman aralığına senkronize edildi ve veriler interpolasyon ile hizalandı.
6. Hız ve konum hesaplama: İvme verilerinin integralini alarak hız ve konum hesaplamaları yapıldı, ivme verilerinden hız ve konum hesaplandı.
7. GNSS verilerinin dönüştürülmesi: GNSS enlem ve boylam değerleri World Geodetic System 1984 (WGS 84) koordinat sisteminde olduğu için, sağa, yukarı ve yükseklik cinsinden metre cinsine dönüştürüldü.
8. GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu: GNSS ve IMU verileri, ağırlıklı olarak birleştirildi, GNSS verilerine daha fazla ağırlık verildi.
9. Kalman filtresi ve Butterworth filtreleri uygulandı.
10. Yol haritası çizimi: GNSS + IMU Entegre yol haritası çizildive uydu haritası arka planı olarak ayarlandı.
11. Kalman filtresi parametrelerinin ayarlanması: Kalman filtresi optimizasyonu yapıldı, parametreler (süreç gürültüsü kovaryansı, ölçüm gürültüsü kovaryansı, başlangıç hatası) daha doğru tahminler için ayarlandı.
12. Ağırlık değişiklikleri: GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonunda, GNSS ağırlığı artırıldı, IMU ağırlığı azaltıldı; GNSS ağırlığı %95'ten %98'e çıkarıldı, IMU ağırlığı ise %5'ten %2'ye düşürüldü. (Bu adımda, Kalman filtresi ilk uygulandığı haliyle kullanılır ve optimizasyon yapılmaz, böylece sadece ağırlıklara bağlı entegre yol haritası değişimi gözlemlenir.)

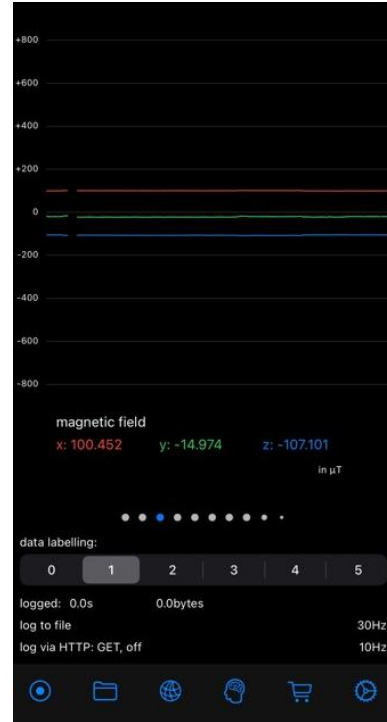
GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu, Butterworth filtresi ve Kalman filtresi gibi filtreleme yöntemleriyle iyileştirilmiştir. Butterworth filtresi, yüksek frekanslı gürültüyü azaltmak amacıyla kullanılırken, Kalman filtresi, verilerin doğruluğunu artırmak için IMU ve GNSS verilerini birleştirerek daha hassas konum tahminleri elde edilmesini sağlamıştır. Bu filtreleme yöntemleri sayesinde, GNSS ve IMU entegrasyonu daha güvenilir ve doğru bir hale getirilmiştir [23]. IMU verileri ise SensorLog uygulamasında toplanmıştır. Ham ivmeölçer verileri toplanmıştır (Şekil 3). Ham jiroskop verileri toplanmıştır (Şekil 4). Ham manyetometre verileri toplanmıştır (Şekil 5).



Şekil 3. SensorLog Uygulamasında Ham İvmeölçer Verilerinin Toplanması



Şekil 4. SensorLog Uygulamasında Ham Jiroskop Verilerinin Toplanması



Şekil 5. SensorLog Uygulamasında Ham Manyetometre Verilerinin Toplanması

Bu veriler, MATLAB ortamında analiz edilmiştir. IMU verilerinden hız ve konum hesaplamaları yapılmış, GNSS ile entegrasyon için zamansal senkronizasyon ve ağırlıklandırma uygulanmıştır. Bu süreçte GNSS verilerine %95, IMU verilerine %5 ağırlık verilerek entegre bir harita oluşturulmuştur (Şekil 6). Son olarak, GNSS yol haritası ve entegre yol haritası karşılaştırılarak aralarındaki farklar incelenmiştir (Şekil 7).



Şekil 6. GNSS (%95 Ağırlıklı) ve IMU (%5 Ağırlıklı) Verilerinin Entegrasyonu ile Oluşan Entegre Yol Haritası

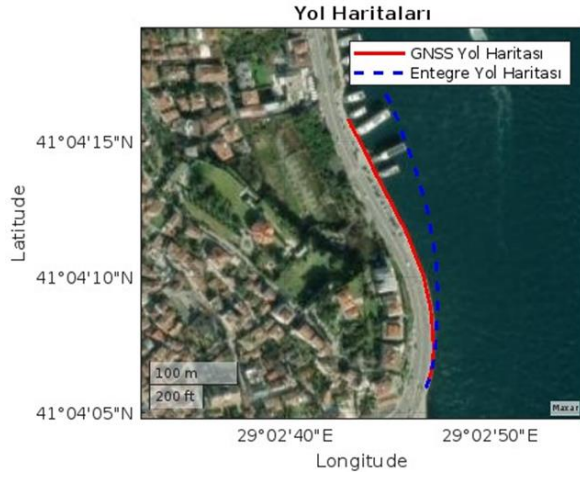
Şekil 6'da görüleceği üzere, IMU verilerinin başlangıçta yürüyüş yolu boyunca yaklaşık 50 m doğru gitmesine rağmen, 50 metreden sonra IMU verisi normal konumdan çok fazla sapma ile konum doğruluğunun bozulduğu görülmüştür. Şekil 7 'de ise GNSS ile IMU verilerinin yaklaşık 50 metreden sonraki farkı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7. GNSS Yol Haritası ve GNSS (%95 Ağırlıklı) ve IMU (%5 Ağırlıklı) Verilerinin Entegrasyonu ile Oluşan Entegre Yol Haritası

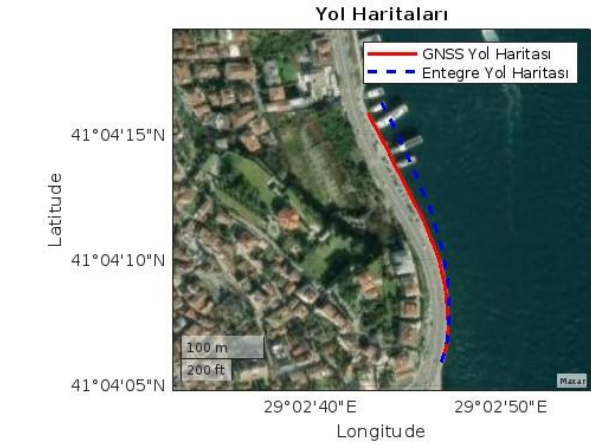
GNSS ve IMU verileri tek başına yukarıdaki literatürde de bahsedildiği gibi herhangi bir algoritma kullanılmadan ve optimizasyon yapılmadan yeterli doğruluk ile kullanılamamaktadır. GNSS verileri uydular ile konum belirlemesi yaptığı için IMU verilerine göre belirli bir standartta konum doğruluğu üretebilir. Bu yüzden genellikle, GNSS 'in sinyal kesikliği yaşadığı durumlarda ya da herhangi bir sebepten veri alamadığı durumlarda, IMU verileri ile bir müddet konum doğruluğu sağlanabilir. Bu uygulama da, bu sebeple GNSS verilerine daha fazla güvenildiği için yüzde 95 ağırlık GNSS verilerine verilmiştir. Şekil 7'de herhangi bir optimizasyon yapmadan sadece normal kalman filtrelemesi ile elde edilen GNSS ve IMU verileri gösterilmektedir.

Daha sonra, Kalman filtresi ve butterworth filtresi uygulanarak GNSS ve IMU verileri optimize edilmiştir. Optimizasyon sırasında, süreç gürültüsü kovaryansı ve ölçüm gürültüsü kovaryansı değerleri dikkatlice ayarlanmıştır. Süreç gürültüsü kovaryansı, IMU verilerindeki gürültünün etkisini azaltmak için artırılmış, ölçüm gürültüsü kovaryansı ise GNSS verilerine daha fazla güven sağlamak amacıyla azaltılmıştır. Ayrıca başlangıç hata kovaryansı (P) değeri daha düşük bir seviyeye indirilerek filtreleme daha hassas hale getirilmiştir. Bu süreçte elde edilen GNSS yol haritası ve Kalman filtresinin optimizasyonu sonucu oluşan entegre yol haritası gösterilmiştir (Şekil 8). Şekil 7 ve 8 'in temel farkı, Kalman filtresinin parametrelerinin optimize edilmesidir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, IMU verilerinin doğru rotaya daha fazla yaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu çıkarım, Kalman filtresi uygulanmadan önceki GNSS ve IMU entegrasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, filtre parametrelerinin optimize edilmesi sonucunda IMU verilerinin GNSS referans rotasına olan ortalama konumsal sapmasının azaldığı tespit edilerek yapılmıştır. Özellikle yürüyüş rotasının başlangıç bölgesinde (0-50 metre), IMU verilerinin Kalman filtrelemesi sonrasında GNSS verilerine daha yakın seyrettiği, harita üzerinde IMU kaynaklı sapmaların önceki entegre yol haritasına kıyasla yaklaşık 10 metre azaldığı analiz edilmiştir. Bu durum, bu IMU verilerindeki süreç gürültüsünün azaltılması ve GNSS verilerine daha yüksek güven tanımlanması sonucu elde edilmiştir. Görsel olarak ise, Şekil 8'deki entegre yol haritası, GNSS yol haritası ile daha fazla çakışma göstermekte ve IMU verilerinin rotadan sapma miktarı önemli ölçüde azalmaktadır. Bu nedenle, iyileştirilen Kalman filtresi parametreleri ile IMU verilerinin GNSS doğruluğuna daha fazla yaklaştığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 8. GNSS Verileri ile Oluşturulan Yol Haritası ve Kalman Filtresinin Optimizasyonu Sonucunda Oluşan Entegre (%95 Ağırlıklı GNSS + %5 Ağırlıklı IMU Verileri) Yol Haritası

Bu süreçte, GNSS verilerinin zaman serisi ile IMU verileri zamansal olarak senkronize edilmiştir. Senkronizasyonun ardından GNSS enlem boylam verileri sağa yukarı değerlerine dönüştürülerek IMU verileri ile uyumlu hale getirilmiş ve Kalman filtresi ile her adımda konum tahmini yapılarak hata payı minimize edilmiştir. Filtreleme sonucunda, entegre yol haritasının GNSS yol haritasına daha yakın bir görünüm sunduğu gözlemlenmiştir. GNSS ve IMU verileri optimize edilmiş ve bu sayede sapmalar azaltılmıştır. Bu aşamada, ağırlıklandırma sürecinde GNSS verilerine daha fazla güvenilerek entegrasyonun hassasiyeti artırılmıştır. GNSS verilerinin ağırlığını %98'e çıkarılmış, IMU verilerinin ağırlığını %2'ye düşürülmüştür. Bu sayede, entegre haritanın GNSS yol haritasına daha yakın bir hassasiyet ile yaklaşması sağlanmıştır. Bu değişiklikler sonucu oluşan GNSS yol haritası ve ağırlık optimizasyonu sonucu elde edilen entegre yol haritası gösterilmiştir (Şekil 9). Şekil 8'in Şekil 9'dan temel farkı, kalman filtresi parametrelerinin optimize edilmesidir. Şekil 9'da görüldüğü üzere, IMU verilerinin doğru rotaya daha fazla yaklaştığı ve ilk başlangıçtaki 50 metre IMU verilerinin yaklaşık 70 metre kadar doğruluğunun daha arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 9. GNSS Verileri ile Oluşturulan Yol Haritası ve GNSS ve IMU Verilerinin Ağırlıklarının Değiştirilmesi ile Oluşan Entegre (%98 Ağırlıklı GNSS + %2 Ağırlıklı IMU Verileri) Yol Haritası

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi sonucunda elde edilen haritalar, yürüyüş rotasının genel hatlarını doğru bir şekilde yansıtmıştır. GNSS verileri, yüksek doğruluğu ile yürüyüş rotasını belirlemede etkili olmuş, ancak IMU verilerinin katkısı GNSS sinyal kaybı yaşanan durumlarda tamamlayıcı bir rol üstlenmiştir. Bununla birlikte, IMU sensörlerinin hataları zamanla birikerek entegre haritada doğu yönünde sapmalara neden olmuştur. Bunun sebebi, iPhone 13 Pro IMU sensörünün hassasiyetinin düşüklüğü ya da kullanılan Sensorlog yazılımının verileri hassas bir şekilde elde edilememesi de olabilir. Düşük maliyetli sensörler de genelde bu hassasiyet sorunlarının yaşanması normal bir durumdur. Özellikle cep telefonu gibi akıllı cihazlara yerleştirilen IMU sensörleri düşük hassasiyete sahip olduğu için bu durum konum verisinin doğru elde edilebilmesi açısından büyük önem arz etmektedir.

Bu uygulamada da daha önce de bahsedildiği gibi, (iPhone 13 Pro) GNSS ve IMU verilerinin Kalman filtrelemesi ile entegrasyonu sayesinde konum bilgilerindeki hata payının azaltılması ve daha hassas bir konum belirlenmesi amaçlanmıştır ve yapılan çalışmada GNSS + IMU verilerinin farklı sistemlere sahip olması nedeniyle entegrasyon sırasında oluşan uyumsuzluklar, Kalman filtresi ve diğer optimizasyon yöntemleri ile büyük ölçüde giderilmiştir. Bu süreç, GNSS ve IMU verilerinin birlikte kullanıldığında yüksek doğruluk elde edilebileceğini göstermiştir. Yapılan uygulama, özellikle akıllı telefonlar için oldukça pratik ve maliyet açısından verimlidir, GPS Tracks ve SensorLog uygulamaları sayesinde, iki verinin de telefonda alınması kolay bir şekilde mümkün hale gelmiştir. MATLAB programlama dili sayesinde uygulanan kalman filtrelemesi ve butterworth filtrelemesi sayesinde konum doğruluğunun artılabildiği gözlemlenmiştir.

V. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma, Bebek bölgesinde iPhone 13 Pro kullanılarak kaydedilen GNSS ve IMU verilerinin MATLAB ortamında filtrelenerek entegre edilmesiyle bir yol haritası oluşturmayı amaçlamaktadır. GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu sayesinde konum bilgilerindeki hata payı azaltılmakta ve daha hassas bir konum belirleme sağlanmaktadır. Bu durum hem teorik hem de pratik uygulamalar için önemli katkılar sunmanın yanı sıra; düşük maliyetli sensörlerden elde edilen GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi ile konum doğruluğunun artırılması uygulamalarına önemli katkılar sunmaktadır.

GNSS verileri, yüksek hassasiyeti sayesinde yürüyüş rotasının doğru bir şekilde izlenmesini sağlamıştır. Ancak GNSS verilerinin sinyal kaybı yaşanan bölgelerde, IMU verilerinin tamamlayıcı bir rol oynadığı görülmüştür. IMU verileri, özellikle GNSS verilerinin doğruluğunu artırmak için bir destekleyici unsur olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, IMU sensörlerinden kaynaklanan hatalar zamanla birikerek entegre haritalarda sapmalara neden olmuştur. Bu durum, entegrasyon sırasında kullanılan yöntemlerin ve filtreleme tekniklerinin önemini ortaya koymaktadır.

Kalman filtresi, GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonunda etkin bir rol oynamış ve hata paylarının minimize edilmesine katkı sağlamıştır. Optimizasyon sürecinde, süreç gürültüsü ve ölçüm gürültüsü kovaryans değerleri dikkatlice ayarlanmış, GNSS verilerine daha fazla ağırlık verilmiştir. Bu, entegre haritanın GNSS yol haritasına daha yakın bir görünüm sunmasını sağlamıştır. Ayrıca, GNSS ve IMU verilerinin zaman serisiyle uyumlu hale getirilmesi, senkronizasyon hatalarını en aza indirmiştir.

Bu çalışma iPhone 13 Pro ile elde edilen GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi açısından ilk defa uygulanmasının yanı sıra, iPhone 13 Pro GNSS verilerine herhangi bir ek anten ya da post-process işlemi ile doğruluk artırma çalışması yapılmadan iki verinin birleştirilmesi açısından literatüre yenilikler katmaktadır. Bu çalışmanın bulguları, GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonunda kullanılan tekniklerin doğruluğunu ortaya koymuş ve yürüyüş rotalarının daha hassas bir şekilde haritalanabileceğini göstermiştir. Gelecekteki çalışmalar, daha gelişmiş IMU sensörlerinin kullanımı ve ileri düzey filtreleme tekniklerinin uygulanmasıyla doğruluğun daha da artırılabilir. Bunun yanında, gerçek zamanlı veri işleme ve daha karmaşık algoritmaların entegrasyonu, bu tür sistemlerin performansını artırabilir.

Yapılan uygulama, özellikle akıllı telefonlar için oldukça pratik ve maliyet açısından verimlidir, çünkü sistemde halihazırda bulunan GNSS ve IMU sensörleri sayesinde bu yöntemlerin uygulanması yalnızca telefon

için üretilen basit yazılımlar ile mümkün olabilmektedir. Bu uygulama, GPS Tracks ve SensorLog uygulamaları sayesinde, iki verinin de telefondan alınması kolay bir şekilde mümkün hale gelmiştir. Ayrıca, bu uygulama iPhone 13 Pro GNSS ve IMU verilerinin birbirine entegrasyonu açısından da literatürde yapılan ilk çalışma olma özelliğinin yanında, başka alan ya da cihazlarda kullanılan düşük maliyetli GNSS ve IMU veri entegrasyonu çalışmalarına çeşitli yenilikler getirmektedir. Bu çalışmanın sonuçları, bundan sonra yapılacak konum bazlı sistemlerin geliştirilmesi ve uygulanması için önemli bir referans oluşturmaktadır. Elde edilen deneyimler, düşük maliyetli GNSS ve IMU verilerinin farklı uygulamalarda nasıl daha etkili bir şekilde kullanılabileceğine dair yol gösterici bilgiler sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Kilroy, B. (1999). Two Decades of Development and Evaluation of GPS Technology for Natural Resource Applications.
- [2] Sullivan, M. (2012). A Brief History of GPS. PCWorld.
- [3] Charles, D. (2007). GPS Goes Mainstream. NPR, Technology Section, <https://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=17611103>
- [4] Van Diggelen, F. (2009). WIRELESS-The Smartphone Revolution-Seven Technologies That Put GPS in Mobile Phones Around the World—The How and Why of Location's Entry into Modern Consumer Mobile Communications. GPS World, 20(12), 36.
- [5] Banville, S., & Van Diggelen, F. (2016). Precision GNSS for Everyone. GPS World, 27(11), 43-48.
- [6] Merry, K., & Bettinger, P. (2019). Smartphone GPS Accuracy Study in an Urban Environment. PLoS One, 14(7), e0219890.
- [7] Robustelli, U., Baiocchi, V., & Pugliano, G. (2019). Assessment of Dual Frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone and Positioning Performance Analysis. Electronics, 8(1), 91.
- [8] Robustelli, U., Paziewski, J., & Pugliano, G. (2021). Observation Quality Assessment and Performance of GNSS Standalone Positioning with Code Pseudoranges of Dual-frequency Android Smartphones. Sensors, 21(6), 2125.
- [9] Zhao, H., & Wang, Z.Y. (2012). Motion Measurement Using Inertial Sensors, Ultrasonic Sensors, and Magnetometers with Extended Kalman Filter for Data Fusion. IEEE Sensors Journal, 12(5), 943-953.

- [10] Tanenhaus, M., Carhoun, D., Geis, T., Wan, E., & Holland, A. (2012). Miniature IMU/INS with Optimally Fused Low Drift MEMS Gyro and Accelerometers for Applications in GPS-denied Environments. In Proceedings of IEEE/ION PLANS 2012, Myrtle Beach, South Carolina (pp. 259-264).
- [11] Zhu, R., & Zhou, Z. (2004). A Real-time Articulated Human Motion Tracking Using Tri-axis Inertial/Magnetic Sensors Package. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 12(2), 295-302.
- [12] Ahmad, N., Ghazilla, R.A.R., Khairi, N.M., & Kasi, V. (2013). Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. International Journal of Signal Processing Systems, 1(2), 256-262.
- [13] Chu, T., & Akos, D. (2011). Assisted GNSS—Performance Results of Multiplexed Measurements, Limited Bandwidth, and a Vectorized Implementation. In Proceedings of the 2011 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA, USA (pp. 1007-1018).
- [14] Park, M., & Gao, Y. (2008). Error and Performance Analysis of MEMS-based Inertial Sensors with a Low-cost GPS Receiver. Sensors, 9, 2240-2261.
- [15] Godha, S., & Cannon, M.E. (2007). GPS/MEMS INS Integrated System for Navigation in Urban Areas. GPS Solutions, 11, 193-203.
- [16] Bijker, J., & Steyn, W. (2008). Kalman Filter Configurations for a Low-cost Loosely Integrated Inertial Navigation System on an Airship. Control Engineering Practice, 16, 1509-1518.
- [17] Chu, T., Guo, N., Backén, S., & Akos, D. (2012). Monocular Camera/IMU/GNSS Integration for Ground Vehicle Navigation in Challenging GNSS Environments. Sensors, 12(3), 3162-3185.
- [18] Tamimi, R. (2022). Relative Accuracy Found within iPhone Data Collection. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 303-308.
- [19] Cui, Y., & Ge, S.S. (2003). Autonomous Vehicle Positioning with GPS in Urban Canyon Environments. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 19(1), 15-25.
- [20] Jafarnia-Jahromi, A., Broumandan, A., Nielsen, J., & Lachapelle, G. (2012). GPS Vulnerability to Spoofing Threats and a Review of Antispoofing Techniques. International Journal of Navigation and Observation, Article ID 127072.
- [21] Seo, J., Walter, T., Marks, E., Chiou, T.Y., & Enge, P. (2007). Ionospheric Scintillation Effects on GPS Receivers during Solar Minimum and Maximum. International Beacon Satellite Symposium 2007, Boston, MA (pp. 11-15).
- [22] Shin, Y., Lee, C., Kim, E., & Walter, T. (2021). Adopting Neural Networks in GNSS-IMU Integration: A Preliminary Study. In 2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC) (pp. 1-7). IEEE.
- [23] Sandru, F.D., Nanu, S., Silea, I., & Miclea, R.C. (2016). Kalman and Butterworth Filtering for GNSS/INS Data. In 2016 12th IEEE International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC) (pp. 257-260). IEEE.
- [24] Butterworth, S. (1930). On the Theory of Filter Amplifiers. Experimental Wireless and Wireless Engineering, 7, 536-541.
- [25] Erer, K.S. (2007). Adaptive Usage of the Butterworth Digital Filter. Journal of Biomechanics, 40(13), 2934-2943.
- [26] Shouran, M., & Elgamli, E. (2020). Design and Implementation of Butterworth Filter. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, 9(9), 7975-7983.
- [27] Chui, C.K., & Chen, G. (2017). Kalman Filtering: With Real-time Applications. Springer.
- [28] Shrotriya, A. (2010). Robot Path Planning and Tracking of a Moving Target Using Kalman Filter (Doctoral dissertation). California State University.
- [29] İlvan, A., & Bostancı, B. (2021). İnsansız Hava Araçları İçin Düşük Bütçeli INS/GNSS Sistemi Entegrasyonunda Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Koksuz Kalman Filtresi Yöntemlerinin Karşılaştırılması.
- [30] İnce, C.D. (1999). Dinamik Sistemlerin GPS ve Kalman Filtresi ile Anlık Olarak İzlenmesi (Doctoral dissertation). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.