

Araştırma Makalesi

Akıllı ulaşım sistemleri için LoRa tabanlı telemetri veri aktarım sistemi tasarımı

İnci Umakoğlu^{1*}, Derya Keskin¹, Caner Pense²

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

²Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

*Correspondence: inci.umakoglu@dpu.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1541448

Özet: Uzun menzil (LoRa) teknolojisi, düşük güç tüketimiyle uzun mesafelere veri iletmeye yeteneği sunarak nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarına önemli katkılar sağlamaktadır. Düşük güçlü geniş alan ağı (LPWAN) tabanlı protokoller, IoT cihazları arasında küçük veri paketlerinin uzun mesafelerde iletimini mümkün kılmaktadır. LoRa, coğrafi engeller, doğal afetler veya insan kaynaklı kesintiler gibi olağanüstü durumlarda, kısa menzilli radyo iletişim sistemlerinin yetersiz kaldığı bölgelerde kritik bir iletişim aracı olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, Akıllı Ulaşım Sistemleri'nin (AUS) kesintisiz işleyişini desteklemek amacıyla, düşük güç tüketimiyle uzun mesafeli veri iletimi sağlayan LoRa teknolojisinin uygulanabilirliği incelenmiştir. 3 km menzile kadar sağlanan iletişimle, model uydudaki aviyonik sistem sensörlerinden elde edilen veriler, LoRa modülleri aracılığıyla yer istasyonuna başarılı bir şekilde iletilmiştir. Buna ek olarak, model uyduda yer alan kamera sistemi üzerinden gerçek zamanlı görüntü aktarımı yapılmıştır. Sonuçlar, 700-600 metre aralığında irtifa ve 3 km menzile kadar yapılan saha testleriyle, LoRa teknolojisine düşük maliyetli uydularla kesintisiz veri iletimi ve sistem sürekliliği için uygun bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı ulaşım sistemleri, LoRa, haberleşme, uydusu sistemi

The design of a LoRa-based telemetry data transmission system for intelligent transportation systems

Abstract: LoRa technology provides significant contributions to IoT applications by enabling long-distance data transmission with low power consumption. LPWAN protocols make it possible to transmit small data packets over long distances between IoT devices. LoRa emerges as a critical communication tool in regions where short-range radio communication systems fall short, especially in extraordinary circumstances such as geographical obstacles, natural disasters, or human-induced disruptions. This study examines the applicability of LoRa technology, which enables long-distance data transmission with low power consumption, to support the uninterrupted operation of Intelligent Transportation Systems (ITS). Communication was successfully established over a range of up to 3 km, with data from the avionics system sensors on a model satellite successfully transmitted to the ground station via LoRa modules. Additionally, real-time image transmission was carried out through the camera system on the model satellite. The results, confirmed by field tests conducted at an altitude of 700-600 meters and a range of up to 3 km, show that LoRa technology is a viable solution for uninterrupted data transmission and system continuity with low-cost satellites.

Keywords: Intelligent transportation systems, LoRa, communication, satellite system

* Corresponding author.

E-mail address: inci.umakoglu@dpu.edu.tr

ORCID: 0000-0003-2187-2193, 0000-0002-2786-5421, 0009-0007-2790-720X, (in hierarchical order)

Received 01.09.2024; Received in revised form 27.09.2024; Accepted 03.10.2024

Peer review under responsibility of Bandırma Onyedi Eylül University. This work is licensed under CC BY 4.0.

1. Giriş

Günümüz insanı uzayla iç içedir ve yaşamını alıştığı düzey ve kalitede sürdürebilmesi için uzaya bağımlı hale gelmiştir (Topcu, 2017). Uzaktan algılama verileri işlenerek yeryüzü ile ilgili çok daha çabuk, düşük maliyetli ve sağlıklı veriler elde edilmektedir. Bu çalışmalar ayrıca ulaşılması zor ve çok büyük alanlar üzerinde çalışmalar yapabilmeye imkân vermektedir.

Uydular, Dünya çevresindeki yörüngelerinde hareket ederlerken, sensörler (radyometre) tarafından kaydedilen verileri belirli aralıklarla yer istasyonlarına gönderirler. Gelişen uydu sistemleri verileri yüksek çözünürlükte ve çok daha kısa sürelerde elde etmeye imkân sağlaması açısından birçok bilim insanı tarafından tercih sebebi olmaktadır (Aksoy vd., 2017). Uyduların en önemli faydalarından biri, yer gözlem istasyonları kurulamadığı için verilerin toplanamadığı okyanus, çöl, dağlık alanlar, kutup bölgeleri vs. gibi çok geniş alanlardan meteorolojik bilgilerin elde edilmesidir. Uydu haberleşme sistemi çift yer istasyonu ve en az bir uydudan oluşmaktadır. Uyduya mikrodalga sinyalleri gönderen bir verici yer istasyonu bulunmakla birlikte, bu sinyalleri uydudan alan bir de alıcı yer istasyonu bulunmaktadır. Burada önemli olan sinyallerin uygun frekans ve güce göre alınmasıdır. Uydular sayesinde telemetri verilerinin iletimi sağlanabilmektedir.

Telemetri bir sistem ya da tesisin, uzaktan kablo veya kablosuz olarak izlenmesi veya kontrol edilmesidir. Haberleşme teknolojilerinde son yıllarda büyük ilerlemeler kaydedilmesi sayesinde günümüz telemetri uygulamalarında çoğunlukla kablosuz haberleşme tercih edilmektedir (Başarslan vd., 2016). Radyo frekansı (RF), gelişen teknoloji ile günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok uzun mesafedeki şehirler ve ülkeler arasındaki ölçme ve kontrol için mobil iletişim için küresel sistem (GSM) ve uydu sistemleri kullanılır. Şehir içi mesafeler için, mobil telsiz, cep telefonu veya RF iletişim modülleri ölçme ve kontrol için kullanılmaktadır (Özden ve Dursun, 2010). Bununla birlikte, düşük güç tüketimi ve uzun mesafe veri iletimi sağlayan LoRa teknolojisi, özellikle geniş alanlarda küçük veri paketlerinin etkin bir şekilde iletilmesi gereken uygulamalarda önemli bir çözüm sunmaktadır (Centenaro vd., 2016). LoRa, geniş kapsama alanı ile şehir içi ve kırsal alanlardaki iletişim ihtiyaçlarını karşılayarak, GSM ve RF teknolojilerinin yetersiz kaldığı yerlerde düşük maliyetli ve enerji verimli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. LoRaWAN, düşük veri hızları gerektiren ve yüksek bant genişliği talep etmeyen uygulamalar için idealdir. Bu özellik, Akıllı Ulaşım Sistemlerinde (AUS), araçların ve altyapının birbirleriyle iletişimi için kritik öneme sahiptir (Manzoni vd. 2019). Yüksek frekans kullanan kablosuz haberleşme sistemlerinde birbirini fiziksel olarak görebilen iki nokta arasında iletişim sağlanmaktadır. İletişim için ya birbirini gören iki noktaya ya da bu iki noktayı da görebilen üçüncü bir noktaya ihtiyaç vardır. Örneğin, araçların konum bilgilerini, hızlarını ve diğer önemli verileri toplamak için LoRaWAN tabanlı sensörler kullanılabilir. Bu sensörler, verileri merkezi bir sunucuya ileterek, trafik yönetimi ve yol güvenliği gibi konularda gerçek zamanlı analizler yapılmasına olanak tanır (Xiao vd., 2022).

Çevresel parazitler ve diğer elektronik cihazlardan gelen sinyaller, veri iletimini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, anten ile alıcı arasındaki mesafe arttıkça sinyal zayıflamakta, bu da veri iletiminde gecikmelere ve kayıplara yol açabilmektedir. Yol ağının çevresinde bulunan yapılar ve engellerin etkileri, sinyalin çeşitli yüzeylerden yansması sonucu gürültü ve bozulmalara neden olabilirken, iyonosferik ve atmosferik hava koşulları da sinyal yayılımını etkileyerek sinyal gücü ve iletim kapasitesini azaltmaktadır. Bu durumun etkileri günümüzde özellikle küresel navigasyon uydu sistemi (GNSS) ve küresel konumlandırma sistemi (GPS) gibi küresel konumlandırma ve seyrüsefer sistemlerinin hassasiyetinin önemli ölçüde azalması gibi çok çeşitli sorun ve zorluklar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Veri iletiminde meydana gelebilecek bu sorun ve zorluklar AUS kapsamında kullanılan sistemler açısından önemli sonuçlara neden olabilir. Ülkemizde AUS kapsamında trafik güvenliği ve yönetiminin en üst seviyedeki örnekleri olan Trafik Yönetim Merkezleri otoyollar ve şehirlerimizde yer alan yol ağlarının mümkün olan en güvenli, en düşük gecikme ve sıkışıklık ile yani en yüksek hizmet seviyesi ile hizmet sunmasını amaçlar. Trafik Yönetim Merkezleri yol ağı ve kentsel altyapıda yer alan

kameralar, sensörler, IoT cihazları ve iletişim sistemlerinden faydalanır. Ancak, mevcut Trafik Yönetim Merkezleri incelendiğinde en yeni ve kapsamlı sistemlerin dahi karasal kablolu iletişim sistemleri -ör. fiberoptik sistemler- kullandığı görülmektedir (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2023; Anadolu Ajansı, 2021; Kahramanmaraş Büyükşehir Belediyesi, t.y.). Karasal kablolu iletişim sistemlerinin oldukça uzun ömürlü olduğu ve bant genişliği maliyeti açısından çok önemli avantajları vardır. Bununla birlikte, insan kaynaklı ya da doğal afetler neticesinde karasal kablolu iletişim sistemleri kapsamındaki iletişim hatları fiziki olarak zarar görebilir. Bu ise, iletişim sistemlerinin performansını etkileyebileceği gibi tamamen çalışmasını da durdurabilir.

Özellikle afet sonrası zamanın kritik olduğu müdahale aşamasında, müdahale ekiplerinin etkili yönetimi her açıdan önem arz eder. LoRaWAN teknolojisi ile, sınırlı bir coğrafi alanda dahi olsa, küçük boyuttaki sayısal verinin uzun mesafelerde hızlı iletimi ile müdahale ekiplerinin etkin şekilde yönetilebileceği ortaya konmuştur (Bianco vd., 2021). Benzer şekilde, LoRaWAN teknolojisini kullanan uydular mevcut AUS altyapısında bulunan sistemleri iletişim sistemlerine eklenebilir ve destekleyici bir çözüm olarak gerektiğinde devreye alınabilir. Bu çözümler, afet bölgelerinde son derece değerli olan elektrik enerjisini mümkün olan en verimli şekilde kullanarak uzun mesafeli satısal iletişimi mümkün kılar ve iletişimi kesilen bölgelere hatlar tekrar bağlanana kadar kullanılabilir.

Kablosuz iletişim kusursuz değildir ve iletişim performansı bir çok etmene bağlıdır. Bu etmenler anlık veri iletişiminin oldukça önemli olduğu trafik yönetimi ve altyapı izleme gibi kritik uygulamalarda potansiyel olarak veri doğruluğunu ve güvenilirliğini tehdit edebilir. Bu nedenle, kablosuz iletişim performansını doğru bir şekilde değerlendirmek ve AUS altyapısının kesintisiz iletişimini sağlamak için, gerçek dünya koşullarında yapılan saha testleri büyük önem taşımaktadır. Bu testler, teorik hesaplamalarla elde edilen kapasite tahminlerini doğrulamak açısından kritik rol oynar.

Bu çalışma kapsamında model uydu tasarlanmış, üretilmiş ve saha testleri gerçekleştirilmiştir. Uydu ve yer istasyonu arasında kablosuz iletişim sistemi çift yönlü olarak incelenmiş aynı zamanda hata kodları algoritması ile veri aktarımının denetlenmesi sağlanmıştır. Bu sayede gelen verilerin kontrolü yapılmaktadır. Çarklı ayrılma sistemi ile görev yükü ve taşıyıcının ayrılması gerçekleştirilerek, pasif iniş sistemi ile uygun bir iniş yapması ve veri aktarımı sağlanmaktadır. Model uydu tasarımının canlı görüntü ve veri aktarımı yapabilmesi için uzun mesafeli haberleşme modülleri kullanılmıştır. Tasarlanan model uydunun haberleşme sistemi için E-BYTE E32 433T30D LoRa modülü kullanılmıştır. Lora modülleri kablosuz olarak uzak mesafelere düşük güç tüketimi ile veri aktarımı sağlamaktadır. LoRa, küçük veri parçalarının düşük bit hızlarıyla iletiildiği uygulamalar için son derece ideal bir yöntemdir. LoRa, 1 GHz frekans bandının altında çalışır ve dağıtıldığı bölgeye bağlı olarak 433 MHz, 868 MHz veya 915 MHz radyo bantlarını kullanmaktadır (El Chall vd., 2019). Model Uydu 500-700 metre irtifadan serbest bırakılmış ve 400 metrede iki parçaya ayrılarak çift yönlü haberleşme gerçekleştirmiştir. İnişi sırasında, yer istasyonuna veri aktarımı sağlanmış ve kesintisiz iletişim kurulmuştur. Uydu, canlı görüntü ve veri aktarımı için uzun mesafeli haberleşme modülleri kullanmıştır.

Bu modüller, uydunun aviyonik sisteminden gelen verileri yer istasyonuna aktararak anlık analiz yapılmasını sağlamıştır. Bununla birlikte, geliştirilen LoRa tabanlı telemetri sistemi, AUS'ta kullanılmak üzere uydu teknolojileriyle entegre edilebilir. Uydu tabanlı iletişim, geniş alanları kapsayarak, akıllı ulaşım altyapısının sürekliliğini ve güvenilirliğini artırır. Düşük enerji tüketimi ve uzun menzil gibi özellikleriyle LoRaWAN, akıllı şehirlerin ulaşım ağlarında kritik bir rol oynayacak, gelecekte daha güvenli ve verimli bir ulaşım sisteminin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Günümüzün hızla artan iletişim ve veri iletim ihtiyaçlarına yanıt verebilecek düşük maliyetli ve enerji verimli çözümler sunma gereksiniminden kaynaklanmaktadır. Özellikle afet durumlarında ve geniş alanlara yayılmış altyapılarda kesintisiz ve güvenilir haberleşme ihtiyacı kritik bir önem taşımaktadır. Geleneksel karasal iletişim sistemleri, doğal afetler veya insan kaynaklı müdahaleler sonucu işlevselliğini yitirebilirken, LoRa ve uydu tabanlı iletişim sistemleri, bu gibi durumlarda alternatif çözümler sunmaktadır. LoRa teknolojisinin düşük güç tüketimi ve uzun menzilli veri iletimi kabiliyeti, hem akıllı ulaşım sistemlerinde hem de acil müdahale operasyonlarında önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu çalışma, bu teknolojilerin entegrasyonu ile güvenilir bir iletişim altyapısı geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

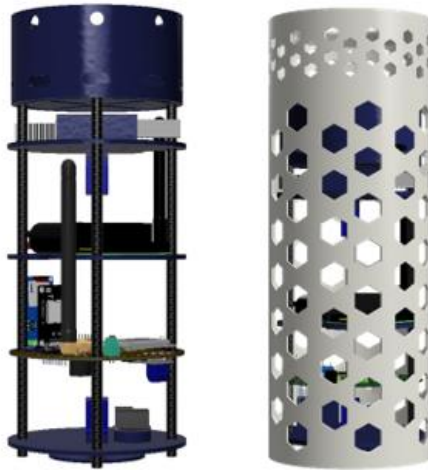
Çalışmanın ikinci bölümünde model uydu tasarımı ve işlevselliği için kullanılan malzeme seçimi ve sistem hesaplamaları ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, model uydunun haberleşme sistemlerinin tasarımı ve LoRa tabanlı veri iletim sistemi detaylandırılmıştır. Son bölümde ise elde edilen bulgular ve sonuçlar verilmiştir.

2. Yöntem

Bu çalışmada, model uydunun tasarımı ve işlevselliği için gerekli malzeme seçimi ve sistem hesaplamaları, belirli mühendislik ilkeleri doğrultusunda yapılmıştır. Model uydunun yapısal dayanıklılığı ve ağırlık optimizasyonu için karbon fiber ve alüminyum alaşımları gibi hafif ve yüksek mukavemetli malzemeler tercih edilmiştir. Görev yükü ve taşıyıcı bölmeleri, darbe dayanıklılığı ve termal stabiliteyi sağlamak amacıyla kompozit malzemelerle güçlendirilmiştir. Enerji verimliliğini sağlamak üzere yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum polimer (Li-Po) bataryalar seçilmiş ve bu bataryalar, uydunun görev süresi boyunca enerji ihtiyacını karşılayacak şekilde optimize edilmiştir. Görev yükü, çeşitli sensörler ve veri toplama cihazlarından oluşmakta olup, bu sensörler LoRa tabanlı haberleşme sistemi ile donatılmıştır. E-BYTE E32 433T30D LoRa modülleri kullanılarak tasarlanan haberleşme sistemi, 433 MHz bandında çalışarak geniş bir kapsama alanında uzun menzilli ve düşük güç tüketimli veri iletimini sağlamaktadır. Ayrıca, hata kodları algoritması kullanılarak veri iletiminin güvenliği artırılmıştır. Uydu, belirli bir irtifada çarklı ayrılma sistemi ile görev yükü ve taşıyıcıdan ayrılmakta, inişi sırasında paraşüt sistemi ile kontrol edilen bir hızla güvenli bir şekilde yere inmesi sağlanmaktadır. Paraşüt sisteminin boyutları, uydu ağırlığı ve iniş hızına göre hesaplanmış, böylece uydunun güvenli ve kontrollü bir iniş yapması hedeflenmiştir.

2.1. Mekanik Tasarım

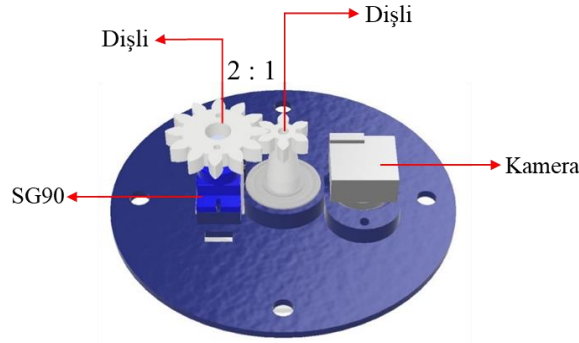
Model uydu taşıyıcı ve görev yükü olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Taşıyıcı tek bir parça halindedir. Taşıyıcı, görev yükünü kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Görev yükü üst kapak, ara katmanlar ve alt tabladan oluşmaktadır. Bu parçalar model uydunun iskeletini oluşturmaktadır. Üç boyutlu (3D) yazıcı kullanılarak basılan olan görev yükü ve taşıyıcı parçaları Polylactic Acid (PLA) türü olan Light Weight (LW) filament ile üretilmiştir. Şekil 1'de görev yükü ve taşıyıcı tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 1. Görev yükü ve taşıyıcı tasarımı.

Model uydu, 400 m irtifaya ulaştıktan sonra, taşıyıcı içerisinde görev yükünün ayrılması beklenmektedir. Görev yükü tamamen otonom olarak ayrılmıştır. Ayrılma sisteminin gerçekleşmesi için kramayer ve düz pinyon ve dişli sistem kullanılmıştır. Pinyon çarka bağlı olarak hareket eden kramayer dişli çubuklar, servo motordan gelen 180°'lik açı ile hareket edecek, bu sayede üstteki kramayer dişli

saat yönünün tersine ve alttaki kramayer dişli saat yönüne dönüş sağlayarak ayrılma işlemi yapılmıştır. Şekil 2’de ayrılma mekanizması tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 2. Ayrılma mekanizması tasarımı.

2.2. Aviyonik Sistem

Model uydu, veri aktarımı için taşıyıcı ve görev yükü aviyonik sistemlerini otonom olarak kullanmıştır. Görev yükü aviyonik sisteminde, Raspberry Pi Pico mikrodenetleyicisi tercih edilmiştir. Tablo 1’de Raspberry Pi Pico mikrodenetleyicisi özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Raspberry Pi Pico mikrodenetleyicisi.

Özellik	Detay
Mikrodenetleyici	Raspberry Pi Pico
İşlemci	Çift çekirdekli ARM Cortex M0+
Veri İşleme	Verileri hızlı bir şekilde işleyebilme yeteneği
Depolama	256 KB RAM ile veri işleme süreçlerini destekleme
GPIO Pin Sayısı	30 adet GPIO pini
İletişim ve Kontrol	Sensörler ve diğer bileşenlerle iletişim kurarak uydunun çeşitli sistemlerini kontrol etme
Desteklenen Programlama Dilleri	MicroPython, CircuitPython, C/C++, Arduino
Enerji Kaynağı Desteği	1.8V ila 5.5V arasında değişen giriş voltajlarını 3.3V'a dönüştürebilen yerleşik buck-boost dönüştürücü
Çalışma Sıcaklığı	20°C - 70°C arasında, zorlu çevre koşullarına dayanıklılık
Kritik Görevler	Model uydu üzerindeki kritik görevleri başarıyla yerine getirme ve verileri etkin bir şekilde iletme

Tabloya ek olarak, Raspberry Pi Pico’nun sunduğu esnek geliştirme ortamı, uydu işlevlerinin programlanmasını oldukça kolaylaştırmıştır. Pico’nun geniş GPIO pin desteği, model uydunun çok sayıda sensör ve bileşenle sorunsuz bir şekilde entegre olmasını sağlamıştır. Ayrıca, buck-boost dönüştürücü sayesinde farklı enerji kaynakları ile çalışma yeteneği, Pico’nun uydu üzerindeki enerji

verimliliğini artırmıştır. Zorlu çevre koşullarında çalışabilme kapasitesi ise, Pico'nun yüksek sıcaklık farklarına rağmen güvenilir performans göstermesine olanak tanımaktadır.

Görev yükünden elde edilen temel veriler basınç, nem ve sıcaklık değerleridir. Bu verilerin toplanması için BME280 sensörü kullanılmıştır. Tablo 2'de BME280 sensörü özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. BME280 sensör özellikleri.

Sensör	BME280
Sensör Özellikleri	Sıcaklık, basınç ve nem ölçümleri yapabilme
Haberleşme Protokolleri	I2C ve SPI protokollerini destekleme
Basınç Doğruluğu	+/- 1 Pa
Kullanım Alanları	Atmosferik koşulları izleme, meteorolojik değerlendirmeler

BME280 sensörü, Raspberry Pi Pico ile birlikte model uyduda atmosferik koşulların izlenmesi için kritik bir rol oynamaktadır. Sıcaklık, basınç ve nem ölçümleri yaparak elde edilen veriler, özellikle meteorolojik değerlendirmelerde önemli bilgiler sağlamaktadır. BME280'ün I2C ve SPI haberleşme protokollerini desteklemesi, mikrodenetleyici ile sorunsuz bir entegrasyon sunarken, yüksek basınç doğruluğu (+/- 1 Pa), elde edilen verilerin güvenilirliğini artırmaktadır. (Karapınar vd. 2016). Bu sensörün kullanımı, model uydusu üzerindeki hava durumu izleme görevlerini başarılı bir şekilde yerine getirmektedir.

Model uydunun ivme ve jiroskop verileri için görev yüküne MPU6050 modülü yerleştirilmiştir. Bu modül, I2C haberleşme arayüzü ile 6 ekseninde ölçüm yapabilmektedir (Şentürk vd. 2019). Tablo 3'te MPU6050 modülü özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. MPU6050 sensör özellikleri.

Sensör	MPU6050
MPU6050 Özellikleri	İvme ölçer ve jiroskop sensörü ile 6 ekseninde hareket algılama
Haberleşme Protokolleri	I2C protokolü ile haberleşme
Kullanım Alanları	Model uydunun hareket ve yönelim verilerini toplama

Ayrıca, uydusu konumunun ve irtifasının belirlenmesi amacıyla GPS Modülü olarak GY-NEO-7M sensörü kullanılmıştır. GY-NEO-7M GPS modülü, model uydunun konum, irtifa ve hız verilerini hassas bir şekilde takip etmek için kullanılmıştır. Bu modül, uçuş sırasında elde edilen verileri güvenilir bir şekilde işleyerek yer istasyonuna iletir. GY-NEO-7M, çeşitli haberleşme protokolleri ile Raspberry Pi Pico'ya sorunsuzca entegre edilebilir ve uydunun yön ve hareket bilgilerini sağlamak amacıyla görev yapar. Uydunun uçuş sırasında konumunu sürekli izleyerek, güvenli iniş ve kurtarma operasyonlarında kritik bir rol üstlenir. Tablo 4'te GY-NEO-7M sensör özellikleri verilmiştir.

Tablo 4. GY-NEO-7M sensör özellikleri.

GPS Modülü	GY-NEO-7M
GPS Özellikleri	56 kanal kapasitesi, 10Hz güncelleme hızı, 500 m/s hız limiti
Haberleşme Protokolleri	UART ve I2C protokollerini destekleme
Kullanım Alanları	Konum, irtifa ve hız takibi

E-BYTE E32 433T30D modülü, model uyduda uzun mesafeli veri iletimi ve düşük güç tüketimi gerektiren haberleşme görevlerini yerine getirmektedir. Modül, çift yönlü veri iletişimi sağlayarak uydudan elde edilen sensör verilerinin güvenilir bir şekilde yer istasyonuna iletilmesini sağlar. UART protokolü ile Raspberry Pi Pico'ya entegre edilen bu modül, yüksek sinyal hassasiyeti ve güvenilir veri iletimi sayesinde geniş alanlarda etkili bir çözüm sunar. LoRa teknolojisi ile donatılmış bu modül, uydunun uçuş sırasında kesintisiz veri aktarımını mümkün kılar. Tablo 5'te E-BYTE E32 433T30D sensör özellikleri verilmiştir.

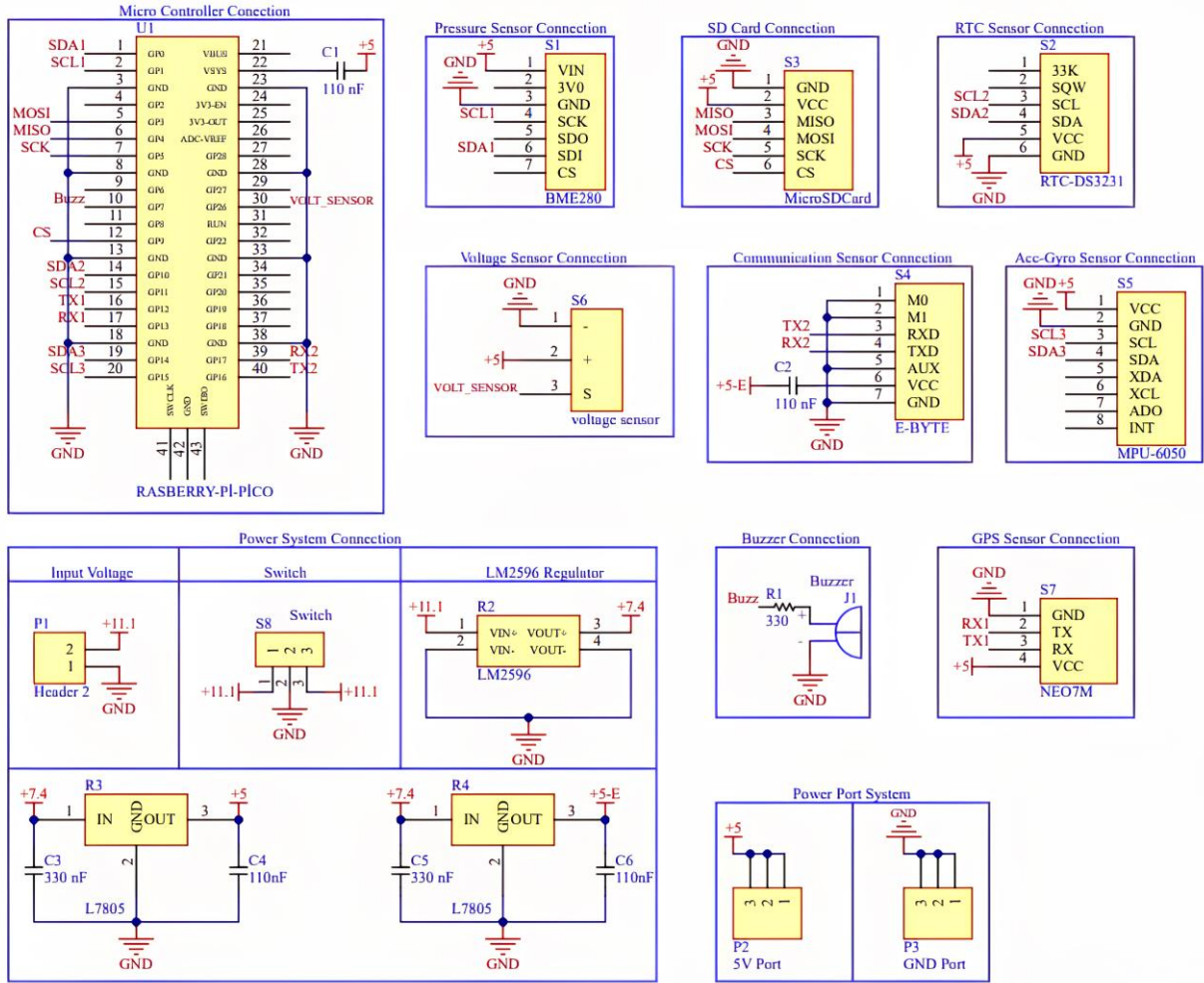
Tablo 5. E-BYTE E32 433T30D sensör özellikleri.

LoRa Modülü	E-BYTE E32 433T30D
Modül Özellikleri	Düşük güç tüketimi, uzun mesafeli veri iletimi, yüksek sinyal hassasiyeti
Haberleşme Protokolleri	UART protokolünü destekleme
Kapsama Alanı	Açık alanda 5 km'ye kadar mesafe
Güç Tüketimi	Maksimum 140 mA
Kullanılan Entegre	SX1278 LoRa entegresi
Kullanım Alanları	Veri iletimi, çift yönlü iletişim, model uydu haberleşme sistemleri

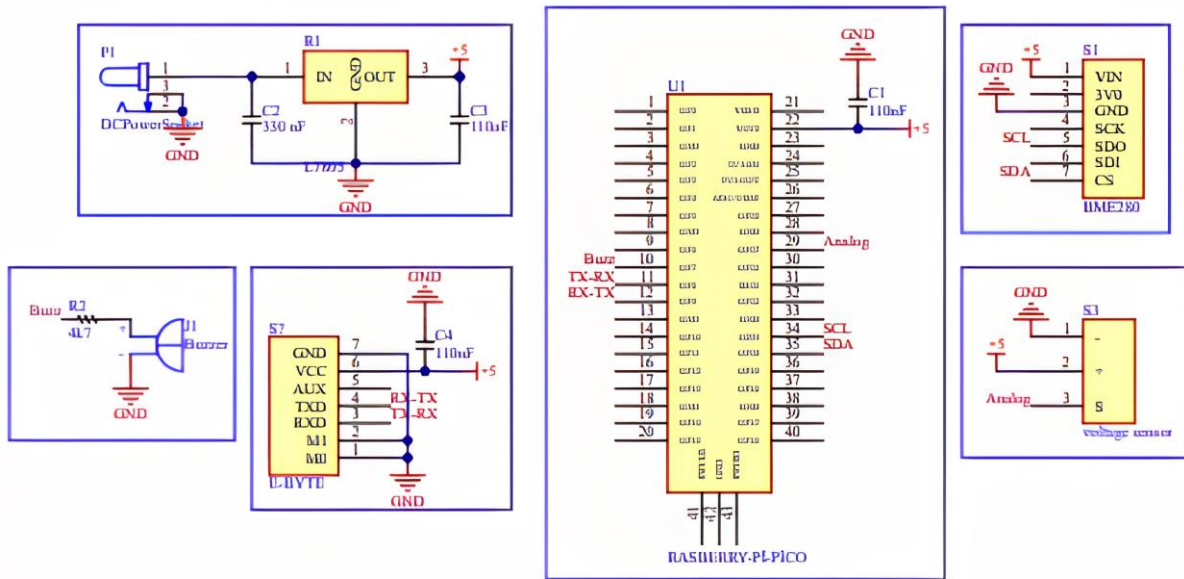
Şekil 3 ve Şekil 4, görev yükü ve taşıyıcı aviyonik sistemlerinin elektronik devre tasarımlarını gösteren şemalardır ve bu şemalar, Altium programı kullanılarak oluşturulmuştur. Sistemin çalışma zamanını ve saat doğruluğunu sağlamak amacıyla RTC DS3231 (Real Time Clock) modülü kullanılmıştır. Bu modül, +/- 1 dk/yıl saat hassasiyeti ile doğru veriler sunmaktadır.

Sistemin güç tüketimi Motorbit voltaj sensörü ile izlenmiş ve DC 0-25V arası ölçüm yaparak sistem stabilitesi kontrol edilmiştir. Verilerin kaydedilmesi amacıyla Micro SD kart modülü kullanılmış ve SPI haberleşme protokolü sayesinde SD kartlara okuma ve yazma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Taşıyıcı ve görev yükü ayrıldıktan sonra veri aktarımının kesintisiz sürdürülmesi için taşıyıcıya ayrı bir elektronik sistem tasarlanmış ve Raspberry Pi Pico mikrodenetleyici kullanılmıştır. Taşıyıcı aviyonik sistemi, görev yüküne verileri iletmek için E-BYTE E32 433T30D modülünü kullanarak çift yönlü veri aktarımını sağlamıştır.



Şekil 3. Görev yükü kartı şematik görünümü.



Şekil 4. Taşıyıcı kartı şematik görünümü.

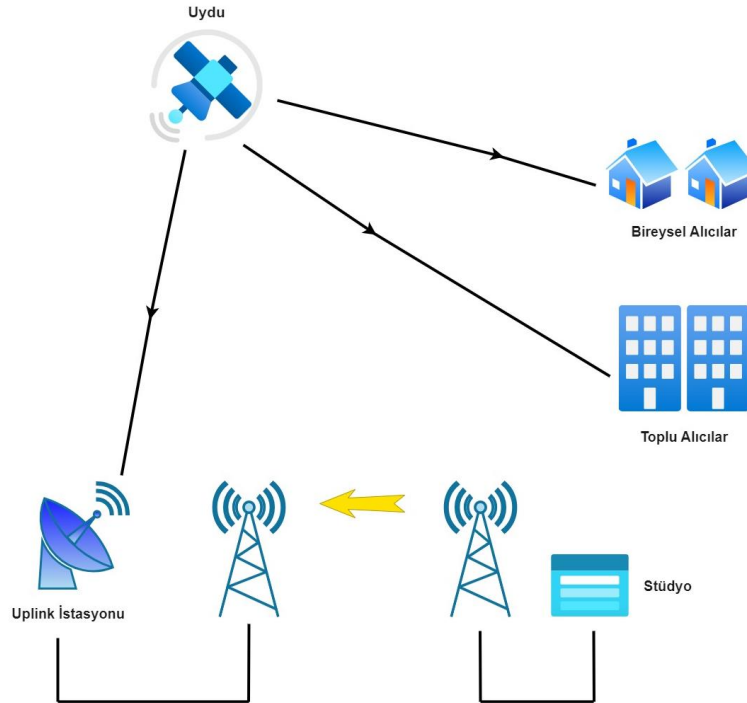
2.3. Haberleşme Sistemi

AUS'un gelişimi ve yaygınlaşması ile, kablosuz veri iletişimi daha uzun mesafelere daha az enerji harcayarak ulaşım gereksinimi giderek artmaktadır. Bu gereksinimi karşılamak üzere, düşük güç tüketimi ve geniş kapsama alanı sunan LoRa teknolojisi, veri iletiminde kritik bir rol oynamaktadır. LoRa, özellikle büyük alanlarda küçük veri paketlerinin etkin bir şekilde iletilmesi gereken uygulamalar için idealdir ve akıllı şehirlerin ulaşım altyapısında önemli bir bileşen haline gelmiştir.

Model uyduda iki aşamalı bir haberleşme sistemi uygulanmıştır. Birinci aşama taşıyıcı – görev yükü ve ikinci aşama görev yükü – yer istasyonu arasındaki haberleşme şeklinde gerçekleşmektedir.

2.3.1. LoRa ve LoRaWAN

LoRa terimi, düşük enerji tüketimiyle uzun mesafelere veri iletimi sağlayan ağ yapıları kurmayı hedefleyen bir kavramdır. LoRa, Semtech'in tescilli bir yayılmış spektrum modülasyon tekniğidir. LoRa'nın fiziksel katmanı, herhangi bir medya erişim kontrolü (MAC) katmanı ile kullanılabilir; ancak LoRaWAN, basit bir yıldız topolojisinde bir ağ işleten önerilen MAC katmanıdır (Bor vd. 2016). Şekil 5'de LoRa haberleşme sistemi şeması belirtilmiştir.



Şekil 5. LoRa haberleşme sistemi şeması.

LoRa, uzun mesafe iletimi sağlamak için kullanılan bir kablosuz modülasyon yöntemi veya bir diğer ifadeyle fiziksel katmandır. Geleneksel kablosuz haberleşme teknolojilerinde fiziksel katmanda kullanılan Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK) modülasyonunun aksine, LoRa, Chirp Spread Spektrum (CSS) modülasyonunu kullanmaktadır. Bu sayede, düşük güç tüketimi yeteneğine ek olarak uzun iletim mesafesi avantajı da sağlamaktadır (Yasintimur vd. 2021). Ağ geçitleri, standart IP bağlantıları aracılığıyla ağ sunucusuna bağlanır ve şeffaf bir köprü görevi görerek RF paketlerini IP paketlerine dönüştürür veya bunun tam tersini gerçekleştirir (Erkan vd. 2022). Bu bağlamda, ağ geçitleri sunucu ile uç cihazlar arasında çift yönlü bilgi transferi sağlar.

LoRaWAN, LoRa teknolojisinin ağ mimarisi ve iletişim protokolüdür. Bu yapı, uç cihazların hizmet kalitesi, enerji verimliliği ve güvenlik seviyelerini belirleyen kritik unsurları içermektedir. LoRaWAN, iletişimde yıldız ağ topolojisini benimser ve bu sayede cihazların merkezi bir noktaya etkin bir şekilde

bağlanmasını sağlar. Şekil 5'te LoRa haberleşmesinin sistemler arası çalışma prensibi akış yönleri gösterilmiştir.

LoRaWAN ağları, veri iletimi için çoklu erişim protokolü kullanır, bu nedenle uç cihazların belirli ağ geçitleriyle eşleşmesine gerek yoktur. Uç cihazlardan gönderilen mesajlar, iletim kanalının boş olup olmadığına bakmadan etkili mesafe içindeki tüm ağ geçitlerinden geçerek bilgi iletişimi gerçekleşir.

LoRaWAN üzerinde herhangi bir uç cihaz, ağa iki şekilde bağlanabilir: Uzaktan aktivasyon ile bir ağ anahtarı ve bir uygulama oturumunun oluşturulmasıyla veya kişisel etkinleştirmeyle sağlanan basit bağlantı ile ağa eklenebilir. Bir LoRaWAN uç cihazı, genellikle pil ile çalışan bir sensör veya bir aktüatör olabilir. Sensörler, fiziksel bir hareketi veya durumu elektriksel sinyale dönüştürürken; aktüatörler ise elektriksel bir sinyalin mekanik bir duruma dönüştürülmesinden sorumludur (Erkan, Fidan ve Oğraş, 2022). Bununla birlikte, LoRaWAN mimarisi ile çalışabilme yeteneği de modülün esnekliğini artırır. LoRaWAN, LoRa teknolojisinin üzerine inşa edilmiş bir ağ protokolü olarak, cihazların ağ üzerinden güvenli ve etkin bir şekilde iletişim kurmasını sağlar. Ancak, E32 433T30D modülü doğrudan LoRaWAN desteği sunmaz; bu modülün LoRaWAN uyumlu bir ağ geçidi ve protokol yığını ile kullanılması gerekebilir. LoRa, her sembolü göndermek için bir frekans bandı kullanan CSS tekniğini kullanır. Bu teknikte, değişken frekanslara sahip sinüzoidal darbeler gibi cıvıltı darbeleri sinyali modüle eder. Bu CSS modülasyonu, LoRa'nın girişime, Doppler ve çok yol etkilerine ve LoRa sinyal yayılımını etkileyen çevresel etkilere karşı direncini artırır (Wiyadi, 2020).

2.3.2. Haberleşme Modülü

Haberleşme sistemi, taşıyıcı aviyonik sisteminden alınan basınç verisinin E-BYTE E32 433T30D modülü ile görev yüküne aktarılmasıyla çalışır. Görev yükünde toplanan veriler, aynı modül aracılığıyla yer istasyonuna iletilir, böylece sistem alıcı-verici olarak işlev görür. LoRa modülasyonu, E32 433T30D modülüne veri iletiminde yüksek hassasiyet ve düşük enerji tüketimi sağlar, bu da geniş alan ağlarında ve enerji verimliliğinin önemli olduğu durumlarda avantaj sunar. LoRaWAN'ın güvenlik özellikleri de AUS için kritik bir öneme sahiptir. IoT cihazlarının güvenliği, veri gizliliği ve sistemin bütünlüğü açısından büyük bir endişe kaynağıdır. LoRaWAN, veri iletiminde şifreleme ve kimlik doğrulama gibi güvenlik önlemleri sunarak, bu endişeleri azaltmaktadır (You vd., 2018). Ancak, bu sistemlerin güvenliğini sağlamak için sürekli güncellemeler ve iyileştirmeler gerekmektedir (Goulart vd., 2022). LoRaWAN'ın sunduğu uzun menzil ve düşük enerji tüketimi, özellikle şehir içi ulaşım sistemlerinde büyük avantajlar sağlamaktadır. Geleneksel iletişim yöntemlerine kıyasla, LoRaWAN ile daha az enerji harcayarak daha geniş bir alanda veri iletimi gerçekleştirilebilir. Bu durum, AUS'un sürdürülebilirliğini artırmakta ve işletme maliyetlerini düşürmektedir (Reyneke vd., 2023). Ayrıca, LoRaWAN, çok sayıda cihazın aynı anda bağlanmasına olanak tanıyarak, yoğun trafik alanlarında bile etkili bir iletişim sağlamaktadır. (Qadir vd., 2018). Bu çalışmada, LoRa fonksiyonlarına sahip E32 433T30D modülü ile çalışılmış ve sürdürülebilirlik artırılmıştır. Tablo 6'da modülün pin girişleri açıklanmıştır.

Tablo 6. E32 Haberleşme Modülü Pin Girişleri.

No.	Adı	Yön	İşlev
1	M0	Giriş	Modülün 4 çalışma modunda birisini seçmek için M1 ile kullanılır. Kullanılmayacaksa şaseye çekilmelidir.
2	M1	Giriş	Modülün 4 çalışma modunda birisini seçmek için M0 ile kullanılır. Kullanılmayacaksa şaseye çekilmelidir.
3	RXD	Giriş	TTL UART veri girişi pini. Bir PC, MCU gibi harici cihazın TX pinine bağlanır. Açık kollektör veya push-pull olarak ayarlanabilir.
4	TXD	Çıkış	TTL UART veri girişi pini. Bir PC, MCU gibi harici cihazın RX pinine bağlanır.
5	AUX	Çıkış	Modülün durumunu göstermek ve harici bir MCU'yu uyandırmak için kullanılabilir. Modül ilk başladığında 0 konumundadır. Push-pull olarak ayarlanabilir.

Modülün M0 ve M1 pinleri kullanılarak dört farklı çalışma modu seçilebilir. Bunlar Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 7. Haberleşme modülünün çalışma modları.

Mod (0-3)	M0	M1	Mod Tanımı	Açıklama
0 Normal	0	0	UART ve kablosuz kanal açık, şeffaf iletim açıktır.	Alıcı mod 0 veya mod 1'de çalışmalıdır.
1 Uyanma	1	0	UART ve kablosuz kanal açıktır, mod 0 ile tek fark, veri ilemeden önce, uyandırma kodunu otomatik olarak artırarak alıcıyı mod 3 altında uyandırabilmektedir.	Alıcı 0,1 veya 2 olabilir.
2 Güç tasarrufu	0	1	UART yakın, kablosuz hava uyandırma modunda, veri aldıktan sonra UART açılır ve veri gönderir.	Verici mod 1 olmalıdır, bu modda iletim yapamaz.
3 Uyku	1	1	Uyku modu, parametre ayar komutu alma kullanılabilir.	Parametre spesifikasyonu hakkında daha fazla ayrıntıya sahiptir.

Yukarıdaki tablodan anlaşılacağı üzere, 0. modda modülde herhangi bir enerji tasarrufu yapılmamaktadır. Modüller, birbirlerine ekstra herhangi bir işlem yapmadan veri alıp gönderebilirler. Mod 1'de ise, Mod 0'dan farklı olarak verici, veri göndermeden önce 3. modda bulunan (uyku modundaki) alıcıyı uyandırmak için otomatik olarak uyandırma sinyali gönderir. Alıcı modüllerin illa Mod 3'te (uyku modu) olmasına gerek yoktur; diğer modlardaki alıcı modüller de vericinin gönderdiği verileri alabilirler. Mod 2'de, alıcı modülün UART (evrensel asenkron alıcı-verici) arayüzü ve RF katı uyku modundadır. Bu alıcıyı uyandırabilmek için, bu alıcıya veri gönderen verici modülün Mod 1'de olması gerekmektedir. Mod 3 ise derin uyku modudur; bu modda modül herhangi bir veri gönderemez veya alamaz. Mod 3'teyken, sadece UART üzerinden modülün parametre ayarları yapılabilir. Başka bir deyişle, modülün parametre ayarlarını yapabilmek için modül Mod 3'te bulunmalıdır. Modülün parametre ayarlarını değiştirirken, UART ayarları 9600 bps (bit per second, saniye başına bit) ve 8N1 (8 veri biti, no parity, 1 stop biti) şeklinde olmalıdır. Tablo 8'de, modülün parametre ayarlarını değiştirecek komutların açıklamaları verilmiştir.

Tablo 8. Haberleşme modülünün parametre ayarları.

No.	Talimat Formatı	Gösterim/İllüstrasyon
1	C0+çalışma parametreleri	C0+5 bayt çalışma parametreleri onaltılık biçimde gönderilir. Toplamda 6 bayt ve art arda gönderilmelidir, (Güç kapatıldığında parametreleri kaydedin).
2	C1+C1+C1	Üç C1 onaltılık biçimde gönderilir. Modül, kaydedilen parametreleri döndürür ve art arda gönderilmelidir.
3	C2+ çalışma parametreleri	C2 + 5 bayt çalışma parametreleri onaltılık formatta toplam 6 bayt olarak gönderilir ve art arda gönderilmelidir. (Güç kapalıyken parametreleri kaydetmeyin)
4	C3+C3+C3	Üç C3 onaltılık biçimde gönderilir. Modül, sürüm bilgisini döndürür ve bunların art arda gönderilmesi gerekir.
5	C4+C4+C4	C4 C4 C4, modül bir kez sıfırlanır.

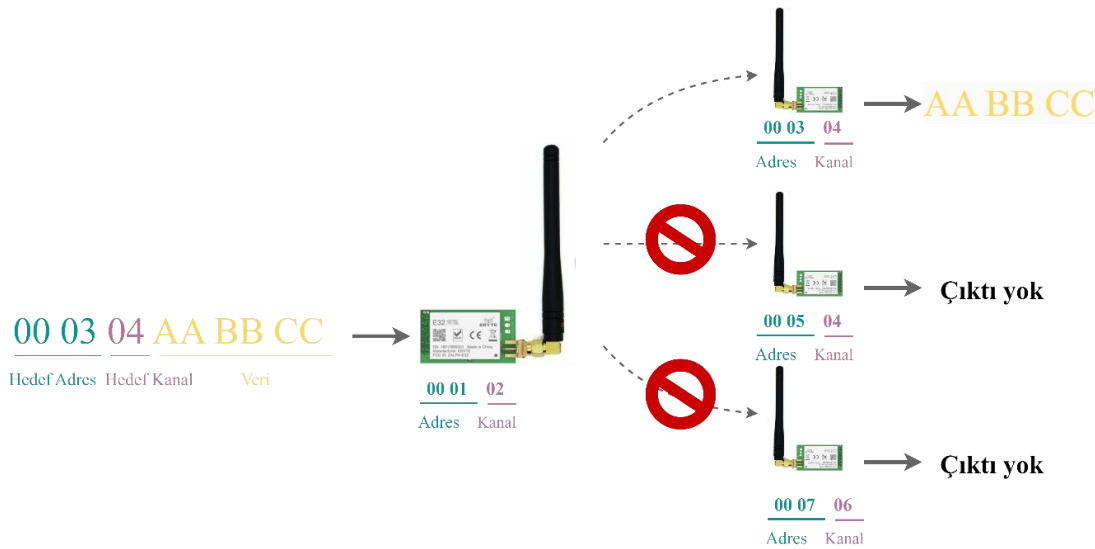
Tabloda gösterilen tüm veriler onaltılık (hexadecimal) tabanda verilmiştir. UART üzerinden parametre ayarları yapılırken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Modül Mod 3'teyken (M0=1, M1=1) arka arkaya üç kez 0xC1 verisi gönderildiğinde, modül mevcut parametrelerini onaltılık taban formatında gönderir. Arka arkaya üç kez 0xC3 verisi gönderildiğinde, modül versiyon bilgisini gönderir. Üç kez 0xC4 verisi gönderildiğinde ise modül resetlenir. C0 ve C2 komutları ise parametre ayarları yapmak için kullanılır. C0 ile başlayan parametre ayarları modülün hafızasına kaydedilirken, C2 ile başlayanlar kaydedilmez ve modülün enerjisi kesildiğinde silinir. C0 ve C2 ile başlayan parametre ayarları toplamda

6 byte olmalıdır. Örneğin, “0xc2, 0x00, 0x01, 0x1a, 0x17, 0xc4” verileri arka arkaya gönderildiğinde parametre ayarları aşağıdaki gibidir:

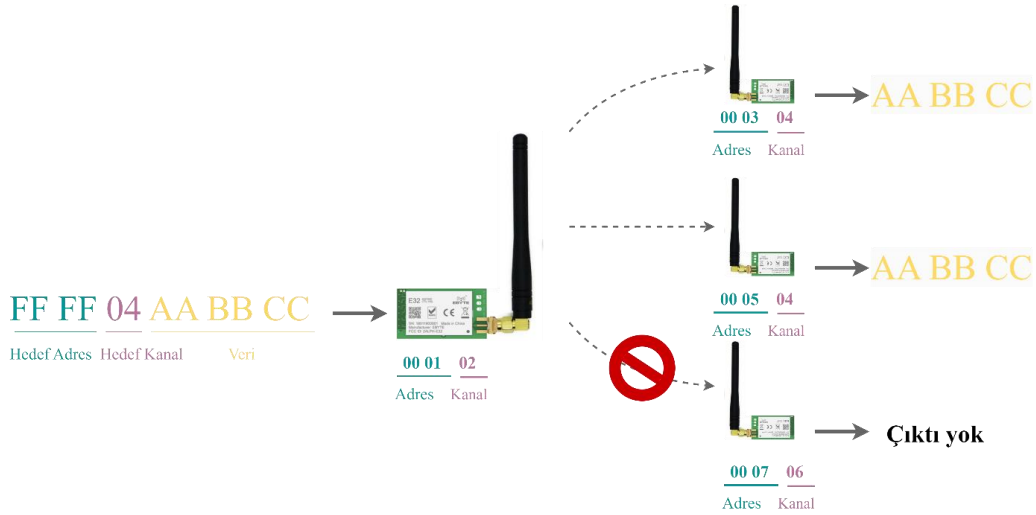
- **0xc2**: Kayıt Ayarı. Güç kesildiğinde ayar verilerini kaydetmez.
- **0x00, 0x01**: Adres Ayarı. Adres 0001 olarak ayarlanmıştır.
- **0x1a**: UART Ayarı. $0x1a = 0b00011010 \rightarrow 00$: 8N1, 011: 9600 bps, 010: Air baud 2400 bps.
- **0x17**: Kanal Ayarı. $0x17 = 23$, 410 MHz + 23 MHz = 433 MHz.
- **0xc4**: Çeşitli Ayarlar. $0xc4 = 0b11000100 \rightarrow 1$: Sabit iletişim, 1: Push-pull TX, RX, 000: Wake-up time (bu uygulamada sleep kullanılmadığı için kullanılmaz), 1: FEC açık, 00: Güç 30 dBm.

Parametre ayarlarında dikkat edilmesi gereken en önemli kısımlardan biri, air baud (kablosuz veri aktarım hızı) ayarıdır. Bu ayar, kablosuz veri iletim hızını 300 bps ile 19200 bps arasında değiştirebilir. Veri iletim hızı ne kadar düşük olursa, modülün menzili o kadar artar. Modül, 410 MHz ile 441 MHz arasındaki frekanslarda çalışabilmektedir. Bu frekans aralığında istediğimiz frekansı seçerek modülün kanalını ayarlayabiliriz. Ancak, sadece aynı kanaldaki modüller birbirleriyle iletişim kurabilir.

Bir diğer önemli ayar ise ileri hata düzeltme (FEC) ayarıdır. FEC hatalı veri iletimini engelleyen bir haberleşme tekniğidir. FEC iptal edilirse, veri iletim hızı artabilir, ancak veri kayıpları yaşanabilir. 21 dBm, 24 dBm, 27 dBm ve 30 dBm değerlerinde çalıştırılabilir. Çıkış gücü arttıkça, iletişim menzili artacak, ancak modülün enerji tüketimi de artacaktır. Bu modülün en dikkat çekici özelliklerinden biri, transparan (transparent) ve sabit (fixed) iletişim kurabilme yeteneğidir. Transparan iletişimde, modül veriyi gönderir ve diğer tüm modüller bu veriyi alabilir. Sabit iletişim modunda ise modül, veriyi sadece belirli bir kanaldaki belirli bir adrese sahip modüle gönderir, yani noktasal iletişim sağlar. Bu, kablosuz bir ağ kurulması durumunda büyük bir kolaylık sunar. Şekil 6 ve şekil 7’de veri gönderim şemaları gösterilmiştir.



Şekil 6. Sabit veri gönderimi.

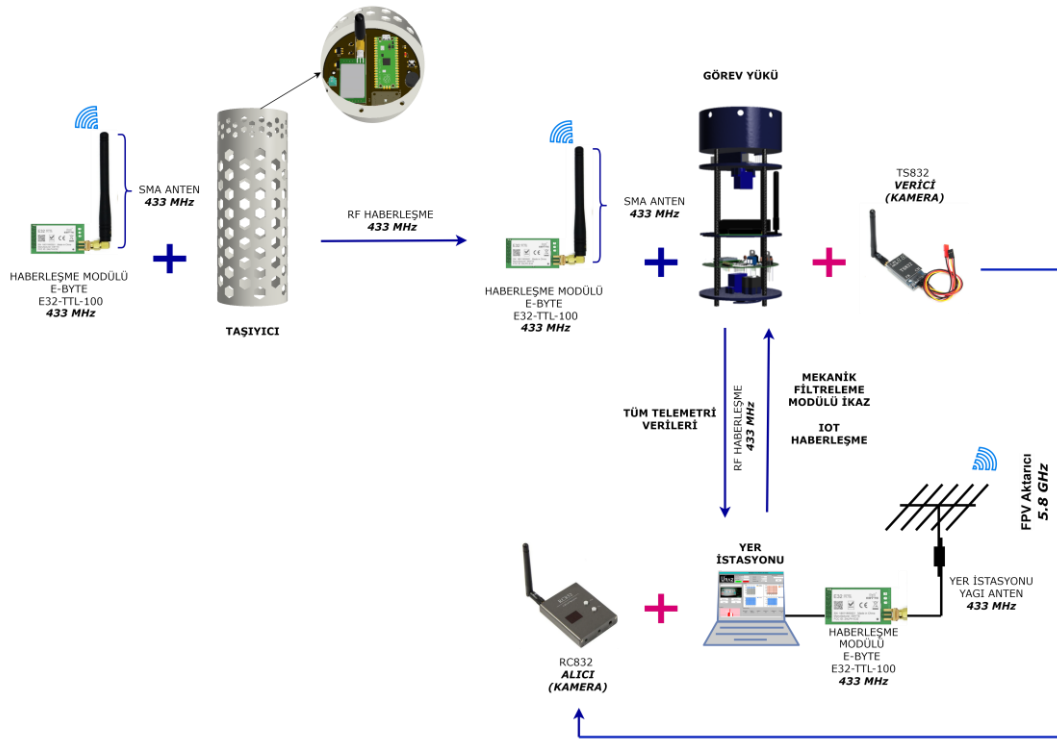


Şekil 7. Transparan veri gönderimi.

Sabit veri gönderiminde, Şekil 6’da, 0001 adresine sahip modül, 0003 adresine sahip ve 4. kanalı kullanan modüle AA BB CC verisini göndermektedir. Bu verileri, farklı adreslere sahip olan ve farklı kanallarda çalışan diğer modüller alamazlar. Şekil 7 transparan veri gönderiminde ise, veri gönderecek olan modül transparan moddardır ve bu durumda modülün herhangi bir adres verisi göndermesine gerek yoktur. Herhangi bir adres değeri gönderilebilir ancak geçersizdir. Modül, 4. kanaldan yayın yapmaktadır ve 4. kanalda çalışan tüm modüller, vericinin gönderdiği verileri alacaktır. Şekilde, 6. kanalda çalışan modülün bu veriyi alamadığı görülmektedir. Tüm bu hesaplamalar ve haberleşme sonucunda, model uydudan alınan telemetri verileri iki aşamalı olarak görev yükünden taşıyıcıya, taşıyıcıdan yer istasyonuna aktarılabilir.

2.3.3. Sistemler Arası Haberleşme

Taşıyıcı ile görev yükü arasındaki sistemler arası haberleşmenin çalışma prensibi, uçuş ve iniş aşamalarında kesintisiz ve güvenilir veri aktarımını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Uçuş süresince görev yükü, her saniye telemetri verilerini toplayarak yer istasyonuna iletir ve bu veriler aynı zamanda görev yükü üzerindeki belleğe kaydedilir. Ayrılma sonrası görev yükü, taşıyıcıdan aldığı verileri de işleyerek yer istasyonuna aktarır. Görev yükü üzerindeki sensörler, uçuş boyunca video görüntülerini kaydeder ve bu görüntüler de gerçek zamanlı olarak yer istasyonuna iletilir. Telemetri verileri ve video görüntüleri, yer istasyonunda anlık olarak izlenir ve grafiksel olarak gösterilir. Görev tamamlandığında, tüm veriler SD karta kaydedilir. Ayrıca, görev yükü ve taşıyıcı, kurtarma ekibi tarafından bulunana kadar sesli ikaz verir ve yer istasyonu arayüzü iniş yapılan konumu gösterir. Bu sistem, telemetri ve video verilerinin güvenilir bir şekilde toplanmasını, işlenmesini ve iletilmesini sağlayarak Şekil 8’de gösterildiği gibi model uydu operasyonlarının başarıyla gerçekleştirilmesine olanak tanır.



Şekil 8. Sistemler arası haberleşme.

RF antenler, kablosuz iletişimde elektromanyetik dalgaları yaymak ve almak için kullanılan kritik bileşenlerdir. Özellikle LoRa modülleri gibi düşük güç tüketimi ve uzun menzil sunan haberleşme teknolojilerinde, antenlerin seçimi, sistemin genel performansını doğrudan etkiler. LoRa modülleri, geniş alanlarda veri iletimi için optimize edilmiş olup, RF antenlerin doğru bir şekilde entegre edilmesi, veri iletiminde güvenilirlik ve verimlilik sağlar. Bu bağlamda, Tablo 4’te karşılaştırılması yapılan görev yükü ve taşıyıcı antenleri benzer yapıdadır ve bu nedenle aynı tabloda değerlendirilmiştir. Görev yükü için DAA043SA100N RF anteni kullanılırken, taşıyıcı anteni, tasarımın istenen ölçülere uygun olması amacıyla 50 mm kısa tip RF anten olarak seçilmiştir. Her iki anten de düşük güç tüketimi ve yüksek verimlilik sağlayacak şekilde tasarlanmış olup, güvenilir veri iletimi için gerekli tüm teknik özellikleri karşılamaktadır. Bu özellikler, sistemin farklı irtifalarda ve koşullarda kesintisiz çalışmasını destekler ve operasyonel başarıyı artırır. Tablo 9’da anten karşılaştırma parametreleri gösterilmiştir.

Tablo 9. Haberleşme modülü için antenlerin karşılaştırılması.

Seçim Kriterleri	Male Anten	RF Anten	RF Anten	RF Anten
Model	DAA043SA064S	ANT-2.4-LCW-RPS	DAA043SA100N	Kısa Tip RF
Frekans	433 MHz	2.4GHz~2.5GHz	433 MHz	433 MHz
Kazanç Faktörü	3 dBi	2.8 dBi	3 dBi	3 dBi
Polarizasyon	Dikey	Dikey	Dikey	Dikey
Boyut	133mm*64 mm	83.1 mm	100 mm	50 mm

Çekim mesafesini etkileyen tek parametre anten kazancı olmadığı için diğer parametreler de incelenmiştir. Çekim mesafesini etkileyen diğer parametreler iletim gücü, alıcı hassasiyeti, alıcı-verici anten kazancı, kayıplar, antenin bağlandığı modül çekim mesafesini etkileyen diğer parametrelerdir.

Parametrelerden de anlaşıldığı gibi çift yönlü iletişimde alıcı verici farklıysa her iki yönün maksimum iletim mesafesi farklıdır. Kullanılacak olan sistemde çift yönlü iletişim olduğundan minimum mesafe dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bağlantı bütçesi, bir iletişim sinyalinin bir telekomünikasyon

sisteminde tüm güç kazanç ve kayıplarının bir hesabıdır. Bu hesap için çekim mesafesini etkileyen tek parametre anten kazancı olmadığı için diğer parametreler de incelenmiştir. 433 MHz'lik antenin ışıma şiddetinin dikey eksenlerindeki yoğunlaşması Bu şekilde gerçekleşen bir iletişimde anten 3dBi kazanç sağlamaktadır.

İletim gücü, alıcı-verici anten kazancı ve alıcı hassasiyeti antenin bağlandığı modül çekim mesafesini etkileyen diğer parametrelerdir. Parametrelerden de anlaşıldığı gibi çift yönlü iletişimde alıcı verici farklıysa her iki yönün maksimum iletim mesafesi farklıdır. Kullanılacak olan sistemde çift yönlü iletişim olduğundan minimum mesafe dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır (Bor, vd., 2016). Bağlantı bütçesi, denklem (1)' de gösterildiği gibi bir iletişim sinyalinin bir telekomünikasyon sisteminde tüm güç kazanç ve kayıplarının bir hesabıdır. Tablo 10'da bağlantı bütçesi parametreleri belirtilmiştir.

Tablo 10. Bağlantı bütçesi parametreleri.

Bağlantı Bütçesi	
P_{Tx} (Verici Güç Çıkışı)	30 dBW
G_{Tx} (Verici Anten Kazancı)	3 dBi
L_{Tx} (Verici Kayıpları, Kablo, Konnektör)	1 dBm
L_M (Çeşitli Kayıplar, Solma Payı, Polarizasyon)	3 dB
L_{FS} (Yol Kaybı, Serbest Alan Kaybı)	98.2 dBm
G_{Rx} (Alıcı Anten Kazancı)	12 dBi
L_{Rx} (Alıcı Kayıpları, Kablo, Konnektör)	1 dB
E-BYTE Verici Gücü	30 dBm
E-BYTE Alıcı Hassasiyeti	-147 dBm

Tüm bu etkileri içeren ve logaritmik olarak ifade edilen bir bağlantı bütçesi denklemi aşağıdaki şekildedir.

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FX} - L_M + G_{RX} - L_{RX} \quad (1)$$

Radyo sinyallerinin yayılması üzerine yapılan çalışmalar, çeşitli modellerin kullanılabilceğini göstermektedir (Jones, 2005). Verici ve alıcı antenler arasındaki yayılmadan kaynaklanan kayıp, genellikle yol kaybı olarak adlandırılır ve mesafeyi dalga boyuna göre normalleştirerek boyutsuz biçimde yazılabilir:

$$L_{FS}(dB) = 20 \log_{10} \left(4\pi \frac{\text{mesafe}}{\text{dalga boyu}} \right) \quad (2)$$

Yukarıdaki bağlantı bütçesi denklemine yerine konulduğunda sonuç Friis iletim denkleminin logaritmik biçimi olur. Bazı durumlarda, mesafe ve dalga boyundan kaynaklanan kaybı ayrı ayrı ele almak uygundur, ancak bu durumda, her seçim farklı bir sabit ofset içerdiğinden, hangi birimlerin kullanıldığını takip etmek önemlidir. Aşağıda kullanılan denklem verilmiştir.

$$L_{FS}(dB) \approx -27,55 \text{ dB} + 20 \log[\text{frekans}(Mhz)] + 20 \log_{10}[\text{mesafe}(m)] \quad (3)$$

- d (uzaklık) = 1000 m
- f (frekans) = 433 MHz
- 20logd: Sinyalin uzaklık nedeniyle kaybettiği güç (mesafe faktörü).
- 20logf: Sinyalin frekansı nedeniyle kaybettiği güç (frekans faktörü).

- -27.55 : Sabit bir değer. Bu değer, frekansın MHz cinsinden, mesafenin metre cinsinden verildiği birim dönüşümü sabitidir.

$$L_{FS} = 20 \log d + 20 \log f - 27.55 = 85.179 \text{ dBm} \quad (4)$$

Alıcı kayıpları L_{RX} ve L_{TX} , anten ile alıcı arasındaki koaksiyel kablolar, konnektörler ve alıcı cihazın iç bileşenlerinden kaynaklanan sinyal zayıflamalarıdır. Koaksiyel kablolardaki iletkenlik ve dielektrik kayıplar, sinyalin frekansa bağlı olarak zayıflamasına yol açar. Her bir konnektör de küçük miktarda yansıma ve iletim kayıplarına neden olur. Zamanla bu kayıplar çevresel etkiler nedeniyle artabilir ve toplamda alıcı cihazın performansını etkileyebilir. Bu tür pasif bileşenlerden kaynaklanan toplam kayıp, yaklaşık 1 dBi olarak hesaplanmış ve genel bağlantı bütçesinde dikkate alınmıştır.

- $L_{RX} = 1 \text{ dBm}$
- $L_{TX} = 1 \text{ dBm}$
- $30 \text{ dBW} + (-1 \text{ dBm}) + 3 \text{ dBi} + (-85.18 \text{ dBm}) + (-3 \text{ dBm}) + (-1 \text{ dBm}) + 12 \text{ dBm}$
- Hesaplama $P_{RX} = -45.18 \text{ dBm} > -147 \text{ dBm}$ olduğundan teorik olarak E-BYTE modülü ve antenler sorunsuz bir şekilde haberleşme sağlayacaktır.

Tablo 11’de taşıyıcı anten özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 11. Taşıyıcı Anten Özellikleri

Seçim Kriterleri	Anten
Model	Mini Anten SMA 90 derece
Frekans	420- 470 MHz
Kazanç Faktörü	3 dBi
Polarizasyon	Dikey

Hesaplanan bağlantı bütçesi, taşıyıcı anten için geçerlidir ve görev yükünden farklı olarak boyutlandırma gerektirir; bu durum, taşıyıcı aviyonik sisteminin mekanik boyutlarından kaynaklanmaktadır. Hesaplanan P_{RX} değeri -43.67 dBm ise, teorik olarak E-BYTE modülü ve antenlerin sorunsuz bir iletişim sağlayacağı öngörülebilir, çünkü bu değer -147 dBm ’den büyüktür. Taşıyıcı antenin yapılan testler ve denemeler sonucunda, çevresel parazitler, haberleşme modülü güç tüketimi ve diğer cihazlardan gelen sinyaller gibi faktörlerin yanı sıra, taşıyıcı-görev yükü-yer istasyonu arasındaki mesafe arttıkça iletişim güçlükleri yaşandığı tespit edilmiştir. Tablo 12’de yer istasyonu anten özellikleri belirtilmiştir. Denklem (5), (6) ve (7) sırasıyla tüm kazanç ve kayıp hesaplamalarını göstermektedir.

Tablo 12. Yer istasyonu anten özellikleri.

Seçim Kriterleri	Anten
Model	12 dBi Yagi Anten
Frekans	415-445 Mhz
Kazanç Faktörü	12 dBi
Polarizasyon	Dikey

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FX} - L_M + G_{RX} - L_{RX} \quad (5)$$

$$L_{FX} = 20 \log d + 20 \log f - 27.55 \quad (6)$$

$$L_{FS} = 20 \log d + 20 \log f - 27.55 = 94.722 \text{ dBm} \quad (7)$$

- d (uzaklık) = 3000 m
- f (frekans) = 433 MHz
- $L_{RX} = 1 \text{ dBm}$
- $L_{TX} = 1 \text{ dBm}$
- $30 \text{ dBW} + (-1 \text{ dBm}) + 3 \text{ dBi} + (-94.722 \text{ dBm}) + (-3 \text{ dBm}) + (-1 \text{ dBm}) + 12 \text{ dBm}$
- Hesaplama $P_{RX} = -54.72 \text{ dBm} > -147 \text{ dBm}$ olduğundan teorik olarak E-BYTE modülü ve antenler sorunsuz bir şekilde haberleşeceklerdir.

Taşıyıcı ve görev yükü antenleri ile yer istasyonu arasındaki haberleşme, LoRa tabanlı modüllerin sağladığı düşük güç tüketimi ve uzun menzil avantajlarıyla optimize edilmiştir. Çevresel parazitler, diğer elektronik cihazlardan gelen sinyaller ve anten ile alıcı arasındaki mesafe gibi faktörler, iletişim performansını etkileyen kritik unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Özellikle yol etkileri, hava koşulları ve sinyal yayılımı gibi çevresel faktörler, veri iletiminde gürültü ve bozulmalara neden olabilir, bu da özellikle GPS verilerinde ve diğer hassas telemetri bilgilerinde aksaklıklara yol açabilir. AUS kapsamında, bu tür zorluklar, trafik yönetimi, altyapı izleme ve acil durum tepkileri gibi kritik uygulamalarda veri doğruluğu ve güvenilirliğini tehdit edebilir. Bu nedenle, anten performansının doğru bir şekilde değerlendirilmesi, teorik hesaplamaların saha testleri ile doğrulanması ve sistemin farklı irtifa ve koşullarda kesintisiz çalışmasını sağlamak için gerekli optimizasyonların yapılması büyük önem taşımaktadır. Yapılan hesaplamalar ve testler, kullanılan E-BYTE modüllerinin ve antenlerin, -147 dBm'den daha yüksek bir sinyal seviyesine sahip olduklarında sorunsuz iletişim sağlayabileceklerini göstermektedir.

3. Uçuş Yazılımı ve Yer İstasyonu Yazılımı

Uçuş sırasında her saniye telemetri verileri sensörler aracılığıyla toplanmıştır. Bu veriler fiziksel değerlere dönüştürülmüştür. Canlı görüntü aktarımı başlatılmış ve model uydusu, görev süresi boyunca video görüntüsünü yer istasyonuna göndermiştir. Canlı görüntü aktarımı gerçek zamanlı olarak izlenmiş ve yer istasyonuna kaydedilmiştir. Uçuş yazılımı, gönderilen paketler muhafaza edilmiş, yeniden başlatılmaya dayanıklı olacak şekilde tasarlanmış ve olası bir arıza durumunda veriler geri yüklenip kaldığı yerden devam edilmiştir. 400 metre yükseklikte, taşıyıcı ve görev yükü bir mekanizma ile otonom olarak ayrılmıştır. Olağanüstü bir durumda, yer istasyonundan model uydusu ayırma butonu aktifleştirilmiştir. Telemetri verilerinin zamana bağlı grafikleri yer istasyonuna gerçek zamanlı olarak çizilmiştir. Bu sürecin ardından kurtarma sinyali gönderilmiştir. Model uydusu, kurtarma ekibi tarafından bulununcaya kadar kurtarma ikazı vermeye devam etmiştir. Şekil 9 görev anında gerçekleşen temel uçuş yazılım mimarisini göstermektedir.



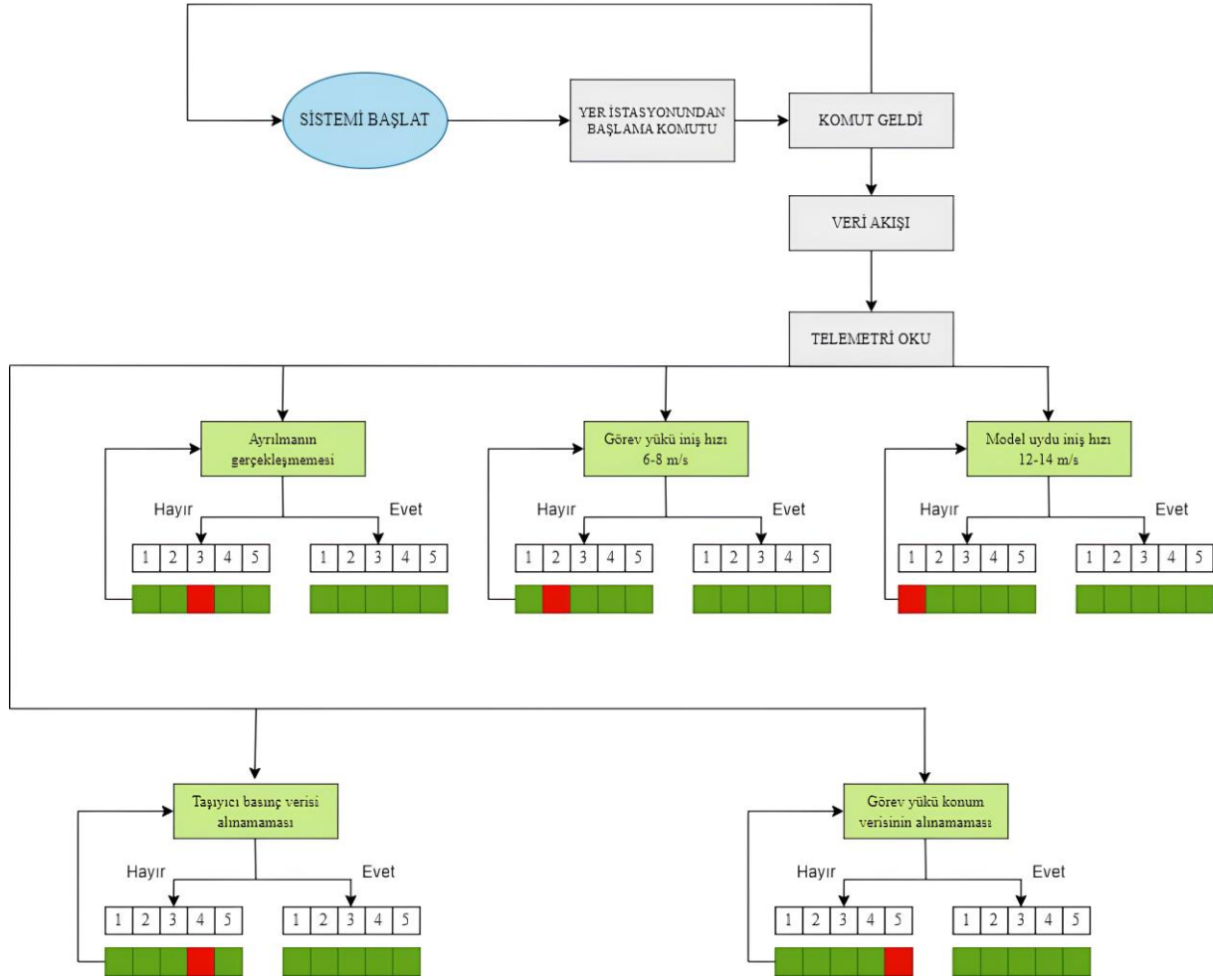
Şekil.9 Temel Uçuş Yazılımı Mimarisi.

Model uydu, havadan alınan telemetri verilerini özgün olarak tasarlanmış yer istasyonunda kontrol edebilmektedir. Uydu ve yer istasyonu arasındaki haberleşme, E-BYTE E32 433T30D modülü ve 433 MHz Yagi anten kullanılarak sağlanmaktadır. Bu sistem, düşük enerji tüketimi ile 8 kilometreye kadar kablosuz haberleşme imkânı sunmaktadır. Yer istasyonu yazılımı, Visual Studio platformunda C++ ve C# programlama dilleri kullanılarak tasarlanmıştır. Veriler hem sayısal hem de grafiksel olarak sunulmuştur. Arayüz geliştirilirken AForge, Gmap ve OpenTK kütüphaneleri kullanılmıştır. Gerekli kodlamalar ile veriler, tasarlanan arayüze aktarılmaktadır. Gmap kütüphanesi kullanılarak, görev yükü ve taşıyıcının konumu tek bir telemetri paketi içinde görüntülenmektedir. Seri porttan okunan veriler, Visual Studio’da bulunan grafiklere aktarılacak için Chart bileşeni kullanılmış, gyro simülasyonu için ise glControl nesnesi tercih edilmiştir. Veri akışı, saniyede bir tekrarlanmakta ve aynı zamanda SD kart modülüne anlık olarak kaydedilmektedir. Uydunun konumu, gerçek zamanlı olarak yer istasyonunda görülebilmektedir. 1 Hz frekansında alınan telemetri verileri, yer istasyonunda canlı olarak görüntülenmekte ve alınan her yeni paketle bilgiler güncellenmektedir. Bu sayede, veriler kayıpsız bir şekilde saklanmaktadır. Yer istasyonu yazılımında bulunan ayrılma butonu sayesinde, havada bulunan uydu üzerinde mekanik veya yazılımsal bir aksaklık meydana geldiğinde, taşıyıcı ve görev yükü manuel olarak ayrılabilir. Bu sistem sayesinde, çift yönlü haberleşme hatasız bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

3.1. Arayüz Alarm Sistemi

Bu çalışma, uydu tabanlı bir izleme ve kontrol sisteminin, Raspberry Pi Pico mikrodenetleyicisi ve RF haberleşme modülleri kullanılarak nasıl inşa edildiğini ve bu sistemin nasıl işlediğini ele almaktadır. Sistem, uydunun çeşitli alt sistemlerinden gelen verileri toplamak, işlemek ve analiz etmek için tasarlanmıştır. Ayrıca, anormal durumların tespiti durumunda, yer istasyonuna gerekli alarm ve uyarıları iletmektedir. Sensörler, uydunun hız, basınç, sıcaklık, konum gibi kritik parametrelerini sürekli olarak izlemektedir. Bu sensörlerden elde edilen veriler, sistemin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlar.

Raspberry Pi Pico, sensörlerden gelen ham verileri alır ve bunları işlemektedir. Mikrodenetleyici, verilerin belirli aralıklarda olup olmadığını kontrol eder ve bu aralıkların dışına çıkan veriler için alarm durumları tanımlar. Örneğin, hız verisinin beklenen sınırların dışına çıkması durumunda veya basınç ya da konum verilerinin alınmaması durumunda, mikrodenetleyici bir hata durumu algılar ve bu durumu bir alarm olarak işaretler. Şekil 10’da arayüz alarm sistemi şematik olarak belirtilmiştir.



Şekil 10. Alarm arayüzü.

Mikrodenetleyici tarafından işlenen ve analiz edilen veriler, RF haberleşme modülleri aracılığıyla yer istasyonuna iletilir. Bu modüller, düşük güç tüketimi ve uzun menzil özellikleriyle öne çıkmaktadır. RF modülü, yer istasyonuna gönderilecek verileri şifreleyerek güvenli bir veri iletimi sağlar. Şekil 12’de gösterildiği gibi yer istasyonuna gönderilen veriler, sistemin genel durumunu ve olası sorunları belirlemede kullanılır. Sistemin veri işleme aşaması, toplanan sensör verilerinin belirli algoritmalar aracılığıyla analiz edilmesini içerir. Mikrodenetleyici, önceden belirlenmiş sınır değerlerine göre verileri sürekli olarak değerlendirir. Örneğin, hız verisinin belirli bir aralığın dışına çıkması durumunda, mikrodenetleyici bu durumu bir alarm olarak kaydeder. Aynı şekilde, basınç veya konum verisinin sensörlerden alınmaması durumunda da bir hata durumu oluşur ve bu durum da alarm sistemine kaydedilir. Alarm durumunda, RF haberleşme modülü aracılığıyla yer istasyonuna acil durum sinyali gönderilir. Yer istasyonunda bu sinyal, bir dizi görsel ve sesli ikaz ile operatörlere bildirilir. Bu ikazlar, operatörlerin sistemde meydana gelen sorunları hızlı bir şekilde tanımlamalarını ve çözümlenmelerini sağlar. Alarm durumlarının yanı sıra, sistemdeki tüm veriler ve olaylar SD kart üzerinde saklanır. Bu kayıtlar, gelecekte yapılacak analizler ve raporlamalar için önemlidir. Bu veriler, uydu operasyonları sırasında karşılaşılan sorunların anlaşılmasını ve gelecekteki operasyonlar için daha güvenilir sistemler geliştirilmesini mümkün kılar.

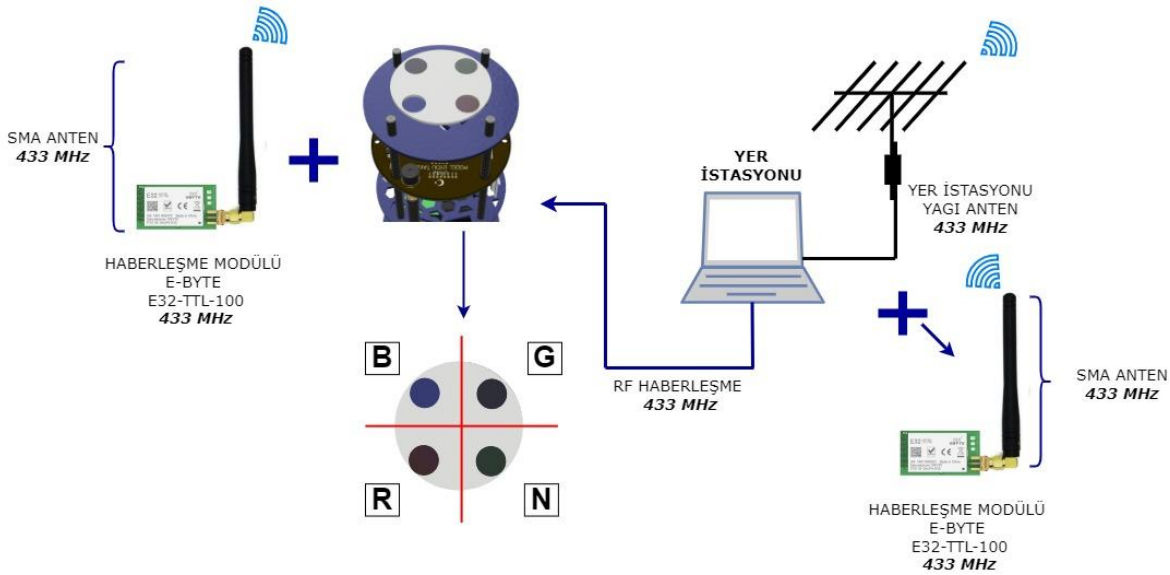
Bu tür izleme ve kontrol sistemleri, AUS için de büyük önem taşımaktadır. AUS kapsamında kullanılan araçlar ve altyapılar, benzer sensörler ve izleme sistemleri ile donatılarak trafik yönetimi, yol güvenliği ve acil durum müdahalesi gibi alanlarda önemli avantajlar sunabilir. Özellikle gerçek zamanlı veri işleme ve alarm sistemleri, AUS’un kesintisiz ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu bağlamda, uydu tabanlı sistemlerin AUS ile entegre edilmesi, geniş alanlardaki trafik ve altyapı izleme kapasitesini

artırarak, daha verimli ve güvenli bir ulaşım ağı oluşturulmasına katkıda bulunabilir. Bu çalışma, uydu tabanlı bir izleme ve kontrol sisteminin inşasında, Raspberry Pi Pico mikrodenetleyicisi ve RF haberleşme modüllerinin nasıl kullanıldığını detaylı bir şekilde ele alırken, bu sistemin işleyişine de odaklanmaktadır.

3.2. Mekanik Filtreleme Modülü

Görev yükü taşıyıcı parçasından ayrıldıktan sonra, LoRa haberleşme modülleri kullanılarak arayüzden gönderilen belirli komutlar ile mekanik filtreleme modülü aktif hale getirilir. Şekil 13'te gösterilen senaryodan örnek alınarak, '6G4R' gibi bir komut gönderildiğinde, sistem farklı bir renk skalasına geçer.

Her bir komut, sistemdeki disk üzerinde servo motor aracılığıyla 90°'lik bir dönüş hareketi sağlar. Bu hareket, toplamda 10 saniye süresince gerçekleştirilir ve kamera görüntüsünde renk değişimlerinin (kırmızı, yeşil ve mavi) gözlemlenmesine olanak tanır. Komutların doğru bir şekilde gönderilip gönderilmediği LoRa modülleri aracılığıyla kontrol edilir. LoRa teknolojisi, uzun menzilli ve düşük güç tüketimli iletişim sağladığından, bu süreçte güvenilir veri iletimi için ideal bir çözümdür. Sistem uydu haberleşmesinde karşı yönlü kontrol sağlar. Görev yükü taşıyıcı parçasının başarıyla ayrılmasının ardından, yer istasyonunda bulunan operatör, ara yüz üzerinden mekanik filtreleme modülünü aktifleştirmek üzere belirli bir komut gönderir. Bu senaryoda, operatör 4B6G komutunu kullanarak sistemi yönetir. Şekil 11'de mekanik filtreleme modülü haberleşme şeması belirtilmiştir.



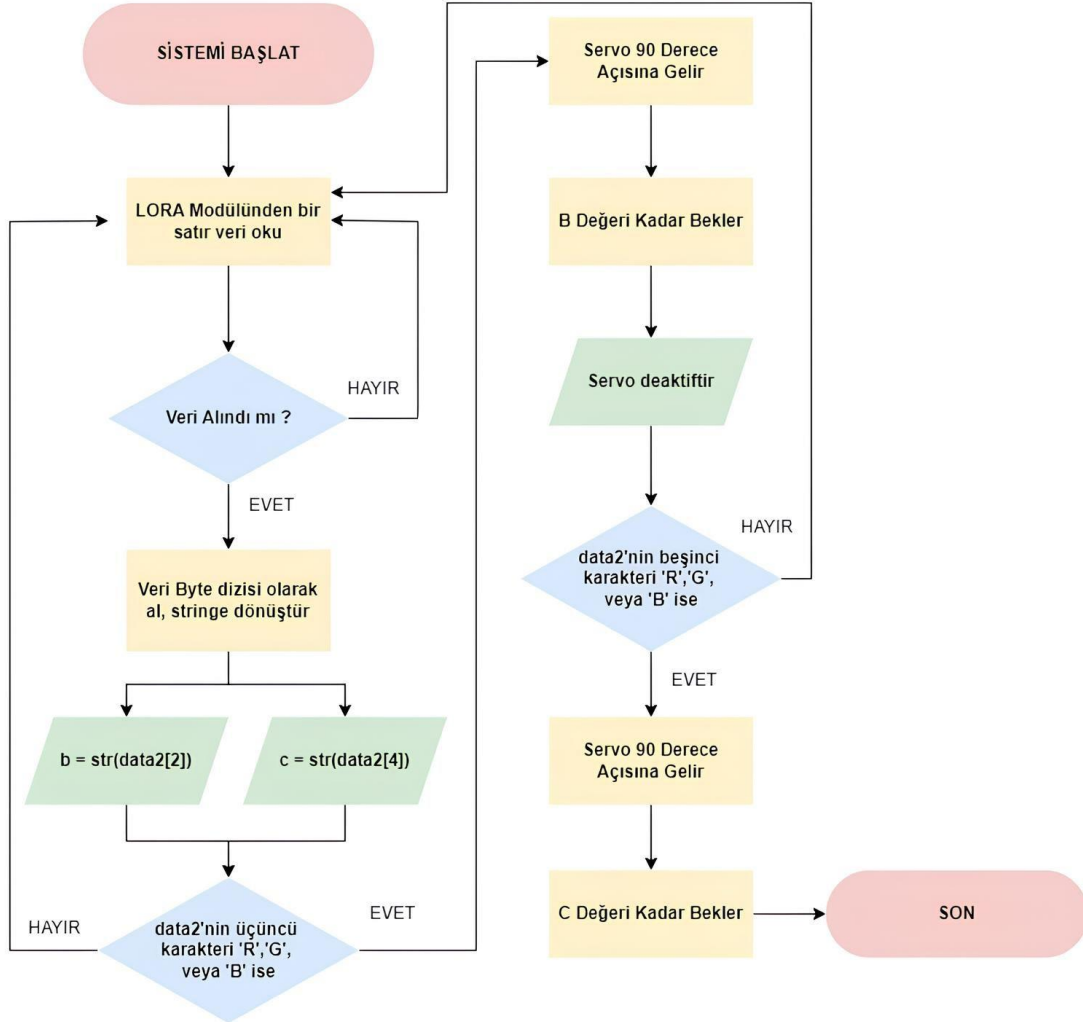
Şekil 11. Mekanik filtreleme modülü.

1. **Komut Gönderimi:** Operatör, arayüz üzerinden 4B6G komutunu gönderir. Bu komut, sistemin önce 4 saniye boyunca mavi renk filtresi, ardından 6 saniye boyunca yeşil renk filtresi ile görüntü vermesi gerektiğini belirtir.
2. **Komutun Alınması ve İşlenmesi:** Uçuş yazılımı, gönderilen komutu alır ve işleme başlar. İlk olarak, mavi renk filtresi için gereken ayarlamaları yapar ve görüntünün 4 saniye boyunca mavi renk filtresinden geçmesini sağlar.
3. **Mavi Renk Filtresinin Uygulanması:** Filtreleme disk, servo motor tarafından kontrol edilerek mavi renk filtresi konumuna getirilir. Servo motor, çarklı sistem üzerinden 90 derece dönerek mavi renk filtresinin aktif olduğu konuma getirilir. Bu pozisyonda, görüntü 4 saniye boyunca mavi renk filtresinden geçer.
4. **İkinci Komutun İşlenmesi:** Yazılım, ikinci komut olan yeşil renk filtresine geçiş için gereken ayarlamaları yapar ve görüntünün 6 saniye boyunca yeşil renk filtresinden geçmesini sağlar.
5. **Yeşil Renk Filtresinin Uygulanması:** Filtreleme disk, servo motor tarafından kontrol edilerek yeşil renk filtresi konumuna getirilir. Servo motor tekrar 90 derece dönerek yeşil renk filtresinin

aktif olduğu konuma getirilir. Bu pozisyonda, görüntü 6 saniye boyunca yeşil renk filtresinden geçer.

6. **Görev Tamamlanması:** Toplamda 10 saniye süren bu operasyon sonucunda, kamera görüntüsünde önce 4 saniye mavi, ardından 6 saniye yeşil renk filtresi başarıyla uygulanmış olur. Operatör, ara yüz üzerinden bu renk değişimlerini doğrular ve görev tamamlanmış olur.

Şekil 12’de mekanik filtreleme modülü yazılım akış şeması belirtilmiştir.



Şekil 12. Mekanik filtreleme modülü yazılım akış şeması.

Bununla birlikte, mekanik filtreleme modülü gibi bileşenler de bu tür sistemlerin işlevselliğini artırır. Mekanik filtreleme modülü, belirli komutlar doğrultusunda görüntülerin farklı renk filtreleriyle işlenmesini sağlar. Örneğin, bir görev sırasında, operatörün gönderdiği komutlar doğrultusunda görüntüler mavi ve yeşil renk filtreleriyle işlenebilir. Bu tür bir modül, LoRa ve RF haberleşme teknolojileri ile entegre edildiğinde, uzak mesafelerdeki cihazların yönetimini ve kontrolünü kolaylaştırır. Operatörler, uzaktaki cihazları sorunsuz bir şekilde kontrol edebilir, görev süreçlerini anında izleyebilir ve gerektiğinde müdahalelerde bulunabilir. Bu, AUS kapsamında araçlar ve altyapılar arasında kesintisiz ve güvenli bir iletişim ağı oluşturulmasına katkıda bulunur. Böylece, AUS sistemlerinde operasyonel verimlilik, veri doğruluğu ve güvenlik seviyeleri yükseltilir.

3.3. Yer İstasyonu Tasarımı

Tablo 8’de verilen tüm veriler taşıyıcıdan görev yüküne, görev yükü aviyonik sistemi aracılığı ile paketler halinde yer istasyonuna aktarılmaktadır.

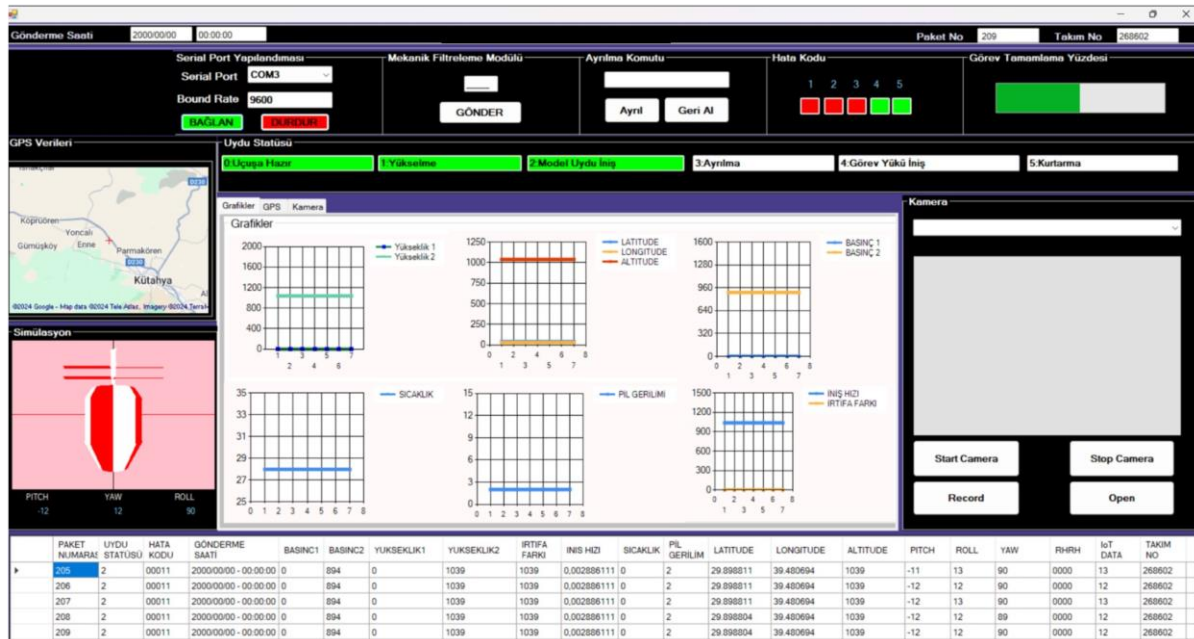
Haberleşme sisteminde paketlenen telemetri verilerinin toplam veri boyutu 86 Byte olup, kullanılan araç boyutu 22 Byte'dir. Bu şekilde oluşturulan toplam paket boyutu ise 108 Byte olarak belirlenmiştir. Telemetri verileri paketler halinde iletilmiştir ve bu paket sayısı yer istasyonundan her sn kontrol edilebilir. Herhangi bir güç kesintisinde dahi paket numaralarında herhangi bir kayıp meydana gelmemiştir. Tablo 13'de telemetri verileri belirtilmiştir.

Örnek Telemetri Paketi: 13,1,10010, 21/04/2024, 14/28/56, 1156, 1156, 40, 40, 30, 12, 23, 9, 44.896, 56.445, 54.865, 10, -36, -50, 6G4R, 23, 48.56, 268602'dir.

Tablo 13. Telemetri Verileri

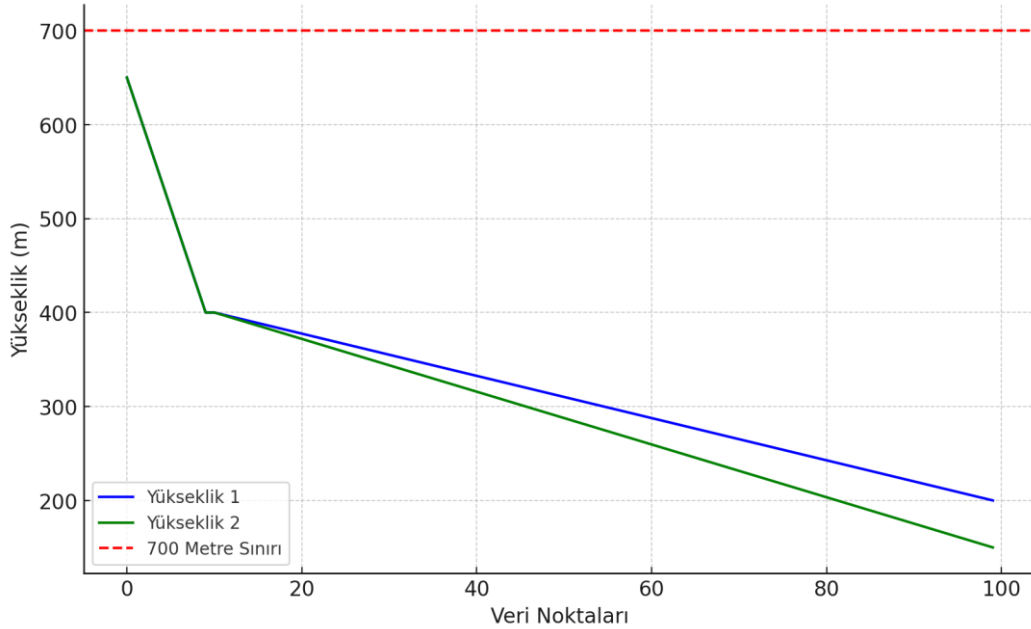
Telemetri Verileri			
Boyut	Veri Formatı	Boyut	Veri Formatı
2	< Paket Numarası >	4	< İvme >
19	< Gönderme Saati >	2	< Nem >
4	< Basınç1 >	6	< GPS1 LATITUDE >
4	< Basınç2 >	6	< GPS1 LONGITUDE >
3	< Yükseklik1 >	6	< GPS1 ALTITUDE >
3	< Yükseklik2 >	2	< PITCH >
4	< İrtifa Farkı >	2	< ROLL >
1	< İniş Hızı >	2	< YAW >
2	< Sıcaklık >	2	< SICAKLIK >

Telemetri verileri paketlenip ASCII formatında yer istasyonu bilgisayarına gönderilir. 1 byte = 8 bit olduğundan, toplam paket boyutu 108 Byte (864 bit) olarak hesaplanmıştır. Telemetri verileri, paketler halinde ASCII formatında yer istasyonu bilgisayarına iletilmekte ve burada grafiksel olarak işlenip analiz edilmektedir. Arayüz, GPS verilerini kullanarak uydu konumunu izlerken, gyro sensörlerinden elde edilen veriler ile görev yükünün doğru konumlandırılması ve kontrol edilmesi mümkün hale gelir. Ayrıca, sistem, çift yönlü ve üçlü haberleşme kontrolü ile telemetri verilerinin güvenilir bir şekilde iletilmesini ve herhangi bir kesinti durumunda veri kaybının önlenmesini sağlar. Şekil 13'te özgün tasarıma sahip yer istasyonu arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 13. Yer istasyonu arayüzü.

Bu kapsamda, yer istasyonuna gönderilen telemetri verileri ve arayüz, AUS için de büyük potansiyele sahiptir. Örneğin, araçların anlık seyir halinde iken GPS ve diğer sensör verilerinin izlenmesi, araç konumunun ve hareketinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır. Böylece, AUS kapsamında araçların ve altyapının anlık yönetimi sağlanarak, trafik güvenliği artırılabilir ve sistem verimliliği optimize edilebilir. Yer istasyonunda gerçek zamanlı olarak grafik haline getirilen ve analiz edilen bu veriler, operatörlerin hızlı ve doğru kararlar almasına yardımcı olur. Yer istasyonunda gösterilmiş olan bazı telemetri verileri Şekil 14 ve Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Yükseklik eğrisi grafiği.

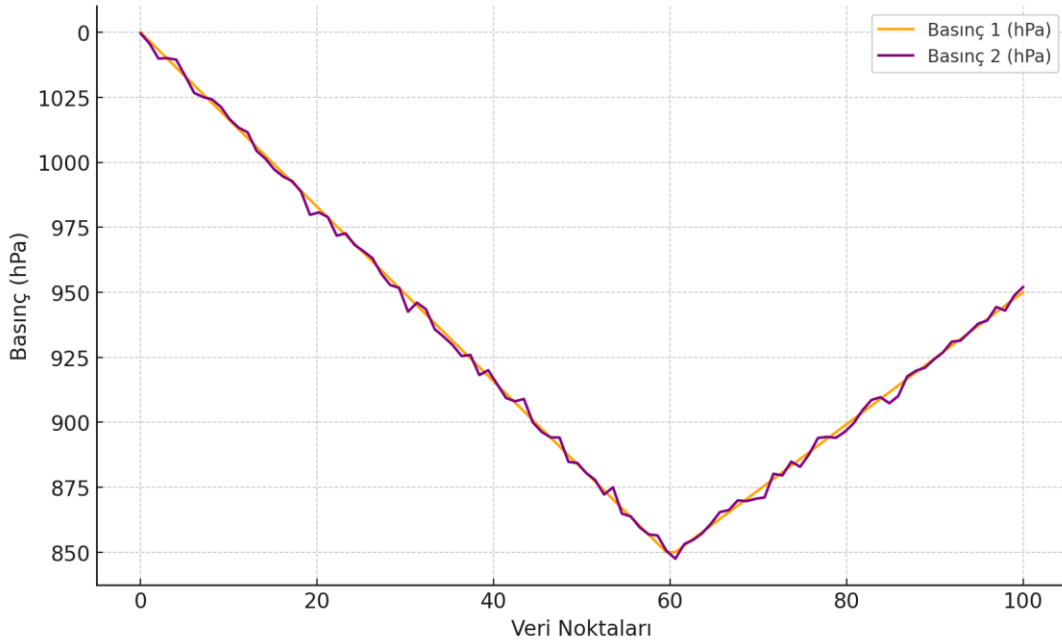
Şekil 15'deki grafikte, "Yükseklik 1" ve "Yükseklik 2" verileri zaman içindeki değişimlerine göre karşılaştırılmıştır. Grafikte y ekseninde, ekseninde metre cinsinden altimetre verisi olan yüksekliği göstermektedir. Model uydunun iniş süresince gerçekleşen görevlerin, yazılımsal olarak hazırlanmış algoritmaya uyum sağlaması gerekmektedir. Bunu kontrol altında bulundurmak ve denetlemek için barometrik basınç sensörümüzden alınan altimetre verisi olan yükseklik değerleri elde edilmiş ve incelenmiştir. Bunun yanı sıra x veri noktaları (zaman veya ölçüm sayısı olarak düşünülebilir) temsil etmektedir. Veri noktaları temel alınmış belirli zaman aralıklarını içermektedir.

Bu grafikte, Yükseklik 1 ve Yükseklik 2 adlı iki farklı yükseklik değerinin zaman içinde nasıl değiştiğini gözlemlemekteyiz. Roket ile 650 metre civarı yüksekliğe çıkış yapan model uydunun her iki yükseklik verisi de aynı seviyeden, yani 650 metreden inişe başlamaktadırlar. İlk 10 veri noktası boyunca, Yükseklik 1 ve Yükseklik 2 senkronize bir şekilde birlikte azalarak 400 metre seviyesine kadar inmektedir. Bu birlikte iniş, her iki sistemin başlangıçta senkronize ve istikrarlı bir iniş gösterdiğini işaret etmektedir. 400 metre seviyesine ulaştıktan sonra, Yükseklik 1 ve Yükseklik 2 farklı hızlarla inişlerini sürdürmektedirler. Yükseklik 1, daha yavaş bir hızla azalmaya devam ederken, Yükseklik 2 daha hızlı bir düşüş eğilimi göstermektedir. Bu farklı iniş hızları, iki sistemin birbirinden bağımsız olarak davranmaya başladığını ve iniş hızlarında farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Grafikte ayrıca, her iki yükseklik değerinin de 700 metre sınırının altında kaldığını görüyoruz. Bu, sistemin operasyonel sınırlarına uygun çalıştığını ve güvenli bir aralıkta hareket ettiğini göstermektedir. Genel olarak bu grafik, başlangıçta birlikte hareket eden iki sistemin, iniş sırasında farklılaşmaya başladığını ve farklı hızlarda irtifa kaybı yaşadıklarını ortaya koymaktadır.

Şekil 17'de sunulan basınç verileri, yer istasyonuna iletilen atmosferik ölçümler üzerinde yapılmış detaylı bir analizi göstermektedir. Bu analiz, model uydunun uçuş süresi boyunca çevresel koşulları doğru bir şekilde algıladığını ve bu verileri yer istasyonuna güvenilir bir şekilde aktardığını açıkça ortaya

koymaktadır. Basınç verileri başlangıç seviyesinden başlatılmış olup ilk 60 veri noktasında yani 650 m irtifaya ulaşıldığında basınç değerlerinin düzenli bir şekilde düşmesi, uydunun yüksek irtifaya çıktığını ve bu süreçte atmosferik basıncın azaldığını göstermektedir. 60. noktadan sonra ise basıncın artması, uydunun inişe geçtiğini ve irtifa azaldıkça atmosferik basıncın tekrar yükseldiğini doğrular niteliktedir. Bu grafik, model uydunun planlanan uçuş profiline uygun olarak hareket ettiğini, çevresel değişimlere duyarlılığını koruduğunu ve görev süresi boyunca güvenilir veri iletimi sağladığını göstermektedir. Şekil 16, bu tür verilerin zaman içerisindeki atmosferik değişimleri izlemek ve analiz etmek için ne kadar önemli olduğunu vurgulamakta olup, özellikle meteorolojik araştırmalar ve uçuş güvenliği çalışmaları açısından büyük bir değer taşımaktadır.



Şekil 15. Basınç değerleri grafiği.

4. Sonuç

Ülkemizde Trafik Yönetim Merkezleri gibi AUS altyapısında bulunan çok sayıda sistem ve sensörün iletişimi karasal kablolu iletişim sistemleri ile sağlanmaktadır. İnsan ve doğa kaynaklı afetler neticesinde kablolu iletişim sistemlerinin fiziki zarar görme riskleri vardır ve bu durum iletişim kesintilerine neden olabilir. LoRa teknolojisi tabanlı uydu iletişim sistemleri, afet sonrasında kritik müdahalelerde etkin yönetim sağlamak ve kesintilere karşı yedek çözüm sunmak amacıyla kullanılabilir. LoRa tabanlı uydu iletişim sistemleri AUS alanında oldukça önemli diğer uygulama potansiyellerine de sahiptir. LoRa tabanlı haberleşme modülleri ve gerçek zamanlı veri izleme yetenekleri, araçların ve altyapının anlık izlenmesini ve yönetilmesini mümkün kılar. Bu sistem, trafik yönetimi, acil müdahale ve altyapı izleme gibi kritik alanlarda veri bütünlüğü ve iletişim güvenilirliğini artırabilir. Ayrıca, sensörlerden alınan verilerin doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlayarak AUS'un etkinliğini ve operasyonel verimliliğini önemli ölçüde geliştirebilir. Özellikle geniş alanlarda kullanılan bu teknolojiler, AUS kapsamında araçların seyir halindeyken kesintisiz iletişim kurmasına olanak tanır, bu durum yol güvenliği ve trafik akışının optimize edilmesine katkı sağlar.

Bu çalışmada, saha testleri yapılan model uydu, belirli verileri analiz edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Aviyonik sistemlerden alınan tüm veriler, yer istasyonunda geliştirilen özel arayüz üzerinden okunarak toplanmıştır. Sıcaklık, nem ve basınç gibi parametreler, atmosferik koşulları izlemek amacıyla kullanılmış ve bu veriler meteorolojik değerlendirmelerde önemli rol oynamıştır. Görev yükü ile taşıyıcı, 700-600 metre irtifada bırakıldıktan sonra, 400 metre yükseklikte birbirinden ayrılarak pasif iniş sistemleri (paraşüt) sayesinde güvenli bir iniş gerçekleştirmiştir. Taşıyıcı aviyonik sistemi, görev yükü aviyonik sistemiyle entegre olarak çalışmakta ve GPS (konum), sıcaklık, nem ve basınç verilerini,

LoRa SX 1278 E32 433T30D haberleşme modülü aracılığıyla görev yüküne aktarmıştır. Toplanan tüm veriler, Raspberry Pi Pico mikrodenetleyicisinde işlendikten sonra, LoRa SX 1278 E32 433T30D haberleşme modülü üzerinden yer istasyonuna başarıyla iletilmiştir. Ayrıca, sistem gerçek zamanlı görüntü aktarımı ve video kaydı da gerçekleştirebilmektedir.

Yer istasyonundaki alıcı modül, bu verileri toplayarak arayüze aktarmaktadır. Tasarlanan arayüz, alarm sistemiyle birlikte, alınan verilerin doğruluğunu anında kontrol eder ve tamamlanmamış görevleri tespit ederek kurtarma sürecini başlatabilir.

Mekanik filtreleme modülü, belirlenen komutlarla çift yönlü haberleşme sistemini yönetmektedir. Görev yükü ve taşıyıcı görevlerini tamamladıktan sonra, taşıyıcı üzerinde bulunan GPS verileri, görev yüküne aktarılmıştır ve yer istasyonu arayüzü üzerinden bu veriler analiz edilerek konum tespiti yapılmıştır. Görev yükü ve taşıyıcıdan ses sinyalleri gönderilmesi için kurulan buzzer donanımı, uydunun konum tespiti zorlu görüş koşullarında tespite uygun hale getirmiş ve kurtarma işlemini hızlandırmıştır.

Sonuç olarak, 700-600 metre aralığında irtifa ve 3.000 menzile kadar gerçekleştirilen saha testleri ile gerçekleştirilen LoRa teknolojisi ile donatılan düşük maliyetli bir uydu, mümkün olan en düşük enerji tüketimi ile en uzun hizmet süresini sağlayabilir. Bu bağlamda, LoRa tabanlı uydu iletişim sistemlerinin afet sonrasında kesintisiz veri iletişimi sağlama ve AUS altyapısında yedek çözümler sunma potansiyeli oldukça değerlidir. Bu sistemler, insan ve doğa kaynaklı afetler neticesinde zarar görebilecek karasal kablolu iletişim sistemlerinin yerini alarak veri bütünlüğü ve iletişim güvenilirliğini artırabilir. Gelecekteki AUS çalışmaları, veri güvenliği, ölçeklenebilirlik ve sensörlerin veri doğruluğunu sağlayan bu sistemlerle, operasyonel verimliliklerini artırabilir ve geniş alanlarda araçların kesintisiz iletişim kurmasını sağlayabilir.

Özellikle, LoRa tabanlı uydu sistemlerinin AUS'a entegrasyonu, gerçek zamanlı veri izleme yetenekleriyle trafik yönetimi, acil müdahale ve altyapı izleme gibi kritik alanlarda güvenilirliği artırabilir. Geniş alanlarda sensörlerden alınan verilerin doğruluğu, AUS'un verimliliğini büyük ölçüde geliştirebilir ve bu sistemlerin entegre edilmesiyle, AUS'un daha uzun vadeli etkileri ve uygulama potansiyeli daha net ortaya çıkacaktır.

Son olarak, gelecekteki araştırmalarda, LoRa tabanlı teknolojilerin veri güvenliği ve yeni nesil AUS projelerine adaptasyonu konularına odaklanması, araştırma sonuçlarının uzun vadeli etkilerini güçlendirecek ve diğer araştırmacılar için yol gösterici olacaktır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

İlgili çalışma, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından 2024 -32 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

Aksoy, S., Bolat, M., & Alp, E. (2017). Noaa/Avhrr Uydusu Meteorolojik Veriler Kullanılarak Güneydoğu Anadolu Bölgesinin Yer Yüzey Sıcaklığının En Küçük Kare Hatası Metodu ile Hesaplanması. Siirt Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği.

Anadolu Ajansı. (2021). Kuzey Marmara Otoyolu ve TÜBİTAK'tan fiber optik tabanlı akıllı ulaşım sistemi. <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/kuzey-marmara-otoyolu-ve-tubitaktan-fiber-optik-tabanlı-akilli-ulasim-sistemi/2386673>

- Başarslan, M. S., Kayaalp, F., & Çelik, F.** (2016). Kısa Mesafe RF Algılayıcı ile Telemetri Uygulaması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 727-733.
- Bianco, G. M., Giuliano, R., Marrocco, G., Mazzenga, F., & Mejia-Aguilar, A.** (2021). LoRa System for Search and Rescue: Path-Loss Models and Procedures in Mountain Scenarios. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(3), 1985-1999. [IEEE Internet of Things Journal. https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3017044](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3017044)
- Bor, M. C., Vidler, J., & Roedig, U.** (2016). LoRa for the Internet of Things. *EWSN 2016 Proceedings*, 16, 361-368
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M.** (2016). Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60-67.
- El Chall, R., Lahoud, S., & El Helou, M.** (2019). LoRaWAN network: Radio propagation models and performance evaluation in various environments in Lebanon. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2366-2378.
- Erkan, E., Fidan, Ş., & Oğraş, H.** (2022). LoRa Modülasyon Tabanlı Saha Aydınlatma Sistemi Uygulaması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10(2), 203-215.
- Goulart, A., Chennamaneni, A., Torre, D., Hur, B., & Al-Aboosi, F.** (2022). On wide-area IoT networks, lightweight security and their applications—a practical review. *Electronics*, 11(11), 1762.
- Karapınar, K., & Kaya, E.** (2016). Gömülü Sistemlerin Seri Haberleşmesi. Karabük Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü.
- Manzoni, P., Calafate, C., Cano, J., & Hernández-Orallo, E.** (2019). Indoor vehicles geolocalization using LoRaWAN. *Future Internet*, 11(6), 124.
- Otopratik.** (2024). Akıllı Ulaşım Sistemleri [Görsel]. Alındığı URL: <https://www.otopratik.com.tr/faydali-bilgiler/arac-bakimi/akilli-ulasim-sistemleri-nedir>.
- Özden, S., & Dursun, M.** (2010). Radyo Frekanslı ile Düşük Maliyetli Su Seviyesi Kontrolü. *Politeknik Dergisi*, 13(4), 313-317.
- Qadir, Q., Rashid, T., Al-Salihi, N., Ismael, B., Kist, A., & Zhang, Z.** (2018). Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs. *IEEE Access*, 6, 77454-77473.
- Reyneke, M., Mullins, B., & Reith, M.** (2023). LoRaWAN & the helium blockchain: A study on military IoT deployment. *International Conference on Cyber Warfare and Security*, 18(1), 327-337.
- Şentürk, Ş., & Fındık, Z.** (2019). İki Tekerlekli Denge Robotu. Karabük Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü.
- Topcu, M.** (2017). Türkiye Uydu haberleşme sistemlerindeki gelişmeler ve GPS uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı.** (2023). Faaliyet Raporu. <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/MerkezBirimler/Kurumsal/FaaliyetRaporu/2023Faaliyet.pdf>
- Wiyadi, E.** (2020). Effect of Vegetation Profile and Air Data Rate on Packet Loss Performance of LoRa E32-30dBm 433 MHz as a Wireless Data Transmission. *Riau: Journal of Physics: Conference Series*.
- Xiao, F., Kuang, W., Dong, H., & Wang, Y.** (2022). Backscatter-assisted collision-resilient LoRa transmission. *Sensors*, 22(12), 4471.
- Yasintimur, S., & Tavas, V.** (2021). NB-IoT ve LoRa Haberleşme Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Performans Analizi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 20(40), 297-313.

You, I., Kwon, S., Choudhary, G., Sharma, V., & Seo, J. (2018). An enhanced LoRaWAN security protocol for privacy preservation in IoT with a case study on a smart factory-enabled parking system. *Sensors*, *18*(6), 1888.

Jones, D. (2005, September 1). Propagation models. Harvard University. Retrieved from https://web.archive.org/web/20050901001655/http://people.deas.harvard.edu/~jones/es151/prop_models/propagation.html