

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN RTK VE GNSS UYGULAMALARI

Kemal Turay¹ ve Ramazan Yeniçeri²
İstanbul Teknik Üniversitesi,
İstanbul

ÖZET

Zamanın her aşamasında ihtiyaç duyulan konum bilgisine ulaşmak için insanoğlu, çeşitli çözüm yolları aramıştır. Günümüzde, gelişen teknoloji beraberinde oldukça başarılı bir şekilde, bu sorun, artık bir sorun olmaktan çıkmıştır. Bu sorunun çözümü olarak Global Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite System-GNSS) kullanılmaktadır. GNSS'ler; günümüzde oldukça kapsamlı çalışma alanları olan ve önem arz eden sistemlerdir. Bu çalışmada "İnsansız Hava Araçları İçin RTK ve GNSS Uygulamaları" başlığı altında, ilk olarak; GNSS'lere dair literatür bilgisi, örnekleri ve çalışma prensibine dair bilgiler verilmiştir. Ardından; RTK (Real-Time Kinematics) gibi daha hassas bir konum belirleme sisteminin gelişimi ve çalışma prensibine değinilmiştir. Bu aşamadan sonra, RTK sisteminin performansının incelenmesi amaçlanmış olup insansız hava araçları üzerinde uygulamaları, farklı senaryolarda testleri yapılmıştır. Bu testlerin sonuçları ile sistemin limitleri belirlenmiş ve raporlanmıştır. Ülkemizde bulunan, aynı zamanda kullanıma sunulan TUSAGA Aktif ve dünyada kullanılan TUSAGA benzeri gelişmiş hassas konum belirleme sistemlerinin, insansız hava araçlarındaki uygulamalarına ve limitlerine dair araştırmaların raporlanması ve sonuçların yorumlanması ile çalışma tamamlanmıştır.

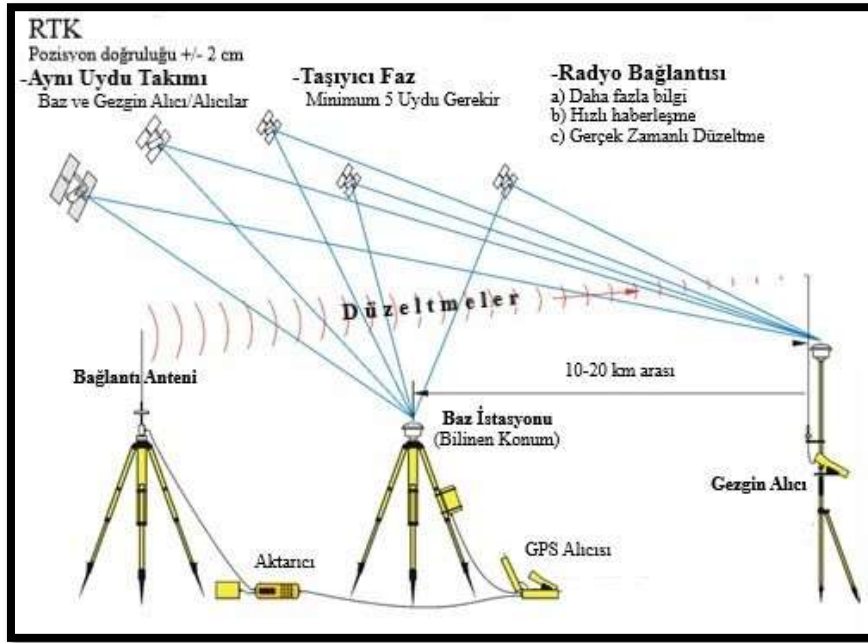
GİRİŞ

Günümüzde global konum belirleme sistemleri oldukça geniş alanlarda kullanılmaktadır. Örnek olarak; haritalama işlemleri, kadastro ölçümleri ve hesaplamaları, askeri ve sivil arama-kurtarma operasyonlarında, otonom araç sistemlerinde, filo araç takip sistemlerinde, hedef belirleme ve güdümlü gibi üzerine eklenilebilecek birçok askeri ve sivil kullanım alanı olarak karşımıza çıkar. İnsansız hava araçları üzerinde uygulamaları, bu projede işlenmesi ve sonuca ulaşılması hedeflenen temel kullanım alanı olarak öne çıkmaktadır. İnsansız hava aracı, amacına uygun çeşitli elektronik cihazlar vasıtasıyla, aktif olarak bir pilot içermeyen, yeryüzünden kumanda edilerek veya otonom bir şekilde görevini havada gerçekleştiren hava araçlarına verilen genel tanımdır [Korkmaz, 2020]. Bu araçların, görevlerini hatırı sayılır derecede daha maliyetsiz ve insan hayatını da riske atmadan yapıyor olması kullanımını oldukça yaygın kılmakta. Çok yakın gelecekte ortaya çıkan bu teknoloji ürünü, sivil hayatta zirai ilaçlama, film endüstrisi, kargolama gibi alanlarda kullanılırken; askeri amaçlara da haberleşme, istihbarat toplama, silahlı olarak hedefleri bulmak ve imha etmek gibi önemli görevleri yaparak hizmet etmektedir. Bu teknoloji, kullanımında yüksek hassasiyetli ve sürekli olarak kullanılabilir konum belirleme sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu sistemlerin başarı oranı ile insansız hava araçlarının güvenilirliği ve yaygınlaşma olanağı birbirine paralel olarak

¹ Lisans Öğr., Uçak Müh. Böl., E-posta: turay18@itu.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, E-posta: yenicerir@itu.edu.tr

ilerlemektedir. Bu aşamada GNSS gibi sistemler insansız hava araçlarının konum belirleme ihtiyacını, araca takılan uygun bir alıcı (GPS) ile karşılamaktadır. Yalnızca alıcı ve GNSS ile yapılan bu konum belirleme sürecinde elde edilen konum bilgisinin doğruluğu, birçok farklı parametreye bağlıdır. Açık alanlarda ve açık havalarda oldukça başarılı sonuç veriyor olsa da kötü hava koşullarında veya gökyüzü görüş açısını engelleyen engellerle dolu ortamlarda ise hem yansıma hem de direkt olarak sinyal alamama gibi sebeplerden ötürü yetersiz ve stabil olmayan bir konum bilgisi sağlamaktadır. Bu da insansız hava aracının uçuş kabiliyetlerini kısıtlar ve istenilen sonuca ulaşmasını engelleyebilir. Geleneksel yöntemin dışında da geliştirilmiş ve daha başarılı birçok yöntem olsa da çok daha fazla konum hassasiyeti gerektiren uygulamalarda yetersiz kalabilirler.



Şekil 1: RTK sistemi [Sickle, 2022].

Bu aşamada, yukarıda Şek. 1 üzerinde şematize edilen RTK sistemleri devreye girmektedir. Uzun yıllar boyunca yapılan çalışmalar ve geliştirmeler sonucu ortaya çıkan bu sistem, konum hassasiyetini hatırı sayılır derecede artırmıştır. Bu sistemin, konum hassasiyetini artırmak üzere GPS sisteminden ayrıldığı noktalar bulunmaktadır. Burada hem ekipman hem de kullanılan algoritmalar fark yaratmaktadır. Kullanılan ekipman açısından olay ele alınırsa; geleneksel yöntemde bulunan konum belirleme cihazının tek başına kullanılması yeterli olmayacaktır. Bu cihaza ek olarak, bir veya birden fazla sabit veya mobil baz olarak kullanılan ve benzer şekilde çalışan konum belirleme sistemleri kullanılmaktadır. Ek olarak eklenen bu konum belirleme cihazlarının, konumları ölçüm süresine de bağlı olarak 1-2 santimetre hassasiyet ile ölçülebilmektedir. Bunun yanında çeşitli matematiksel algoritmalar ile desteklenen bu sistemde, belirsizlik yaratan değişkenlerin, çeşitli çözümlerle daha hassas olarak hesaplanabiliyor olması, istenen konum hassasiyetine ulaşılmasına olanak sağlamaktadır. Hassas ölçüm sonucu, gerçek konumunu hesaplayabilen bu cihazın (baz) oluşturduğu düzeltme verileri ile herhangi bir anda, gerçek zamanlı olarak ve benzer doğruluk oranı ile konumu hesaplanmak istenen aracın konumu belirlenmektedir. Bunun yanında, maliyet ve getiri açısından değerlendirildiğinde, çeşitli uygulamalar için çeşitli seçenekler sunması ile kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu uygulamalardan ilki; sabit ve tek bir bazdan oluşan RTK sistemleridir. Bu tarz uygulamalarda, hassasiyet oranı tek bir bazın hassasiyet oranı ile paralel olmakla beraber iki cihaz arasındaki mesafeye de bağlılık göstermektedir. Bunun yanında birçok sabit bazdan oluşan ve kontrol merkezleri tarafından

belirlenecektir. Mükünse; geliştirmeler yapıp uygulanacaktır. Bu geliştirmelerden ilki uzun süreli ölçümler süresince değerli cihazların alanda bırakılamaması üzerine, bazı haberleşme ile RaspberryPi cihazı aracılığıyla yer istasyonuna bağlanabilmesi olarak amaçlanmıştır. Bu sayede hem kullanım sırasında kullanıcıya hareket alanı özgürlüğü sağlanacak hem de sürekli kullanıma uygun hale gelecektir. Kısaca sonuçlandırmak gerekirse; performans analizleri sonucunda, RTK sisteminin limitlerine dair bir sonuca ulaşılması amaçlanmıştır. Aynı zamanda bu yapılan çalışmanın, TUSAGA-Aktif ve benzeri sistemlerin hakkında detaylı araştırmalar ile derlenecek bilgiler ışığında, performans analizleri ve kullanım imkanları hakkında bir kaynak niteliği kazanması hedeflenmiştir.

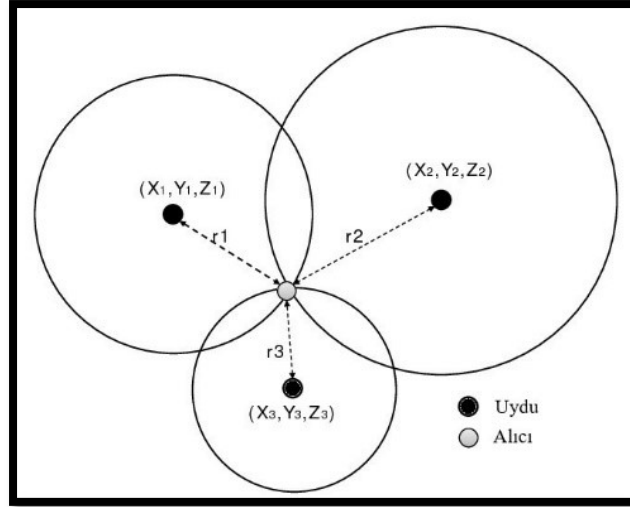
YÖNTEM

Projede öncelikli olarak geniş bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucu elde edilen faydalı bilgi ile test senaryolarının nasıl, nerede ve ne koşullarda olacağına dair fikirler edinilmiştir. Projenin uygulama kısmında, özellikle RTK sisteminin kullanımı ve limitleri hakkında fikir edinme amacı olduğu için senaryolar, RTK'lı ve RTK'sız olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Bu testler gerçekleştirilip karşılaştırılmalı bir biçimde raporlanmıştır. Projenin devamında, Türkiye'de ve dünyada kullanılan, gelişmiş RTK sistemleri araştırılmış ve sistemin maksimum noktaları görülmüştür.

Dünyada Kullanılan Konum Belirleme Yöntemleri

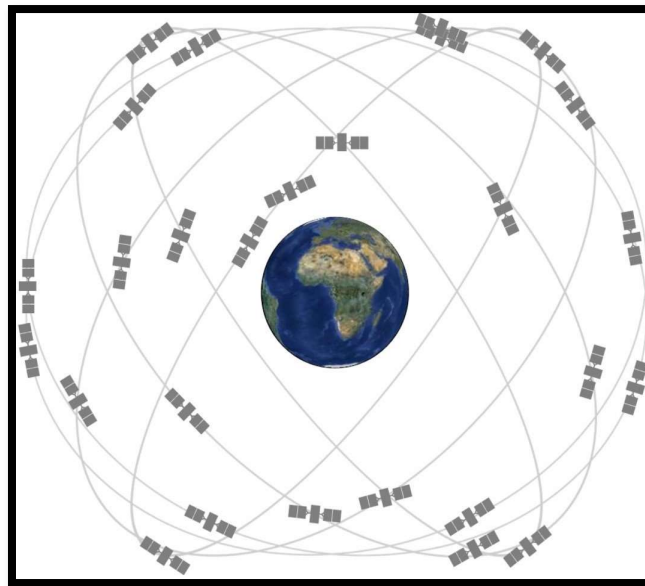
Gelişen teknoloji ve beraberinde gelen gereksinimler üzerine, konum belirleme yöntemleri çeşitlenmiştir. Bu yöntemlerin en temelinde, yaygın olarak kullanılan, tek alıcı ve uydu sisteminden oluşan GNSS-yaygın adıyla GPS- sistemi gelmektedir. Bunun üzerine, yeni eklenen gelişmiş uydu sistemleri ile DGPS, SBAS ve RTK gibi daha kompleks ve hassas ölçüm veren konum belirleme yöntemleri ortaya çıkmıştır.

GNSS: Koordineli evrensel zaman skalasında, (Coordinated Universal Timescale-UTC) uygun bir alıcı ile kullanıcılara, dünya çapında, doğru ve sürekli olarak enlem, boylam, yükseklik ve hız bilgisini sağlayan sistem "Küresel Konum Belirleme Sistemi(GNSS-Global Navigation Satellite System)" olarak adlandırılır [Kaplan ve Hegarty, 2017]. Çalışma prensibi, matematiksel bir hesaplama olan trilaterasyon metoduna dayanır, bu yöntemde, 3 küresel yüzey üzerinde, (X,Y,Z) koordinatlarında 3 nokta bulunmalıdır; bu noktalar yardımıyla 3 boyutlu olarak pozisyon bilgisi hesaplanabilir ancak; 4. bir uydu yardımıyla da zaman senkronizasyon hatası giderilerek konum bilgisi hesaplanır[Dawoud, 2012]. Bu bilgi görsel olarak anlam kazandırılmak üzere Şek. 3'te verilmiştir. Aradaki bu uzaklıklar, uydudan yayınlanan sinyallerin yeryüzüne ulaşma süreleri hesaplanması yardımı ile hesaplanır.



Şekil 3: Trilaterasyon metodu[Dawoud, 2012].

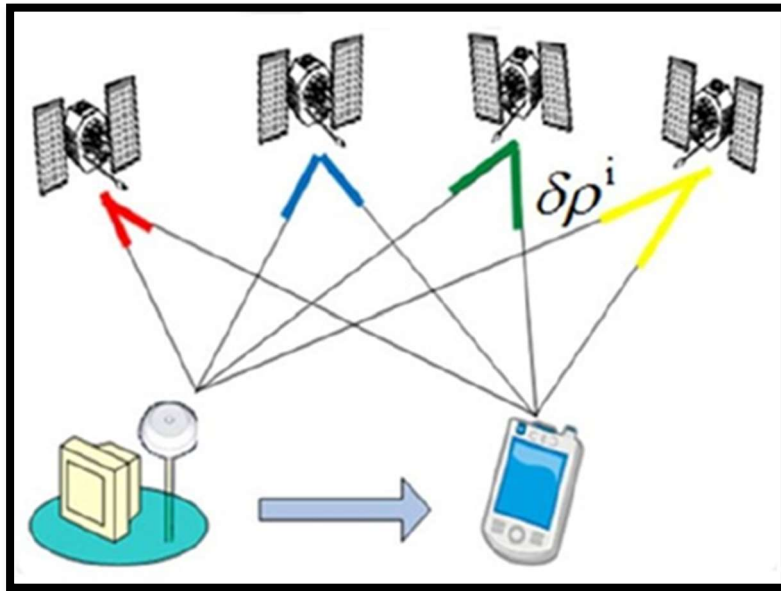
NAVSTAR, tam açılımı ile "Navigation System Using Time and Ranging" adı altında, bu sistemlerin birinci örneği, Amerika Birleşik Devletleri tarafından savunma amaçlı projelerde kullanılmak üzere, 1973 yılında hayata geçirilmiştir[Karaali ve Yıldırım, 1996]. Bu aşamadan itibaren, farklı ülkelerin de ayrı ayrı veya grup olarak çalışmalarını, sistem sürekli olarak gelişerek günümüzdeki halini almıştır. GNSS sistemlerinin, günümüzde hem bölgesel hem de dünya çapında hizmet vermekte olan farklı tipleri mevcuttur. Çin'e ait olan Beidou, Rusya'ya ait GLONASS, ABD'ye ait GPS ve Avrupa Birliği'ne ait Galileo navigasyon uydu sistemleri dünya çapında hizmet vermekte olup bunların yanında Hindistan'a ait olan IRNSS ve Japonya'ya ait QZSS bölgesel olarak hizmet vermektedirler[Başar ve Ceylan, 2018]. Bu sistemlere örnek teşkil etmesi amacıyla, ABD'ye ait olan GPS'in uydu dağılımı Şek. 4'te verilmiştir. Bu uydular 6 yörüngede, her yörüngede 4'er adet olmak üzere toplam 24 adet olarak, dünya üzerinde herhangi bir noktadan, kullanıcının en az 4 adet uydu görebileceği şekilde konumlandırılmıştır [GPS.GOV, 2021].



Şekil 4: GPS uydularının dağılımı[GPS.GOV, 2021].

DGPS-Diferansiyel GPS: Konum belirleme türlerinden bir diğeri de DGPS konum belirleme yöntemidir. Bu yöntem GNSS yönteminin yalnız başına yeterli gelmediği durumlarda kullanılmak üzere, daha hassas ve güvenilir bir konum bilgisi ölçmek için oluşturulmuştur. Amerika Birleşik Devletleri Sahil Güvenlik tarafından, en başlarda deniz araçlarına hassas konum bilgisi verme amaçlı gelişen bu yöntem, zamanla yaygınlaşmıştır ve genel kullanımda da birçok örneği bulunmaktadır. DGPS yönteminde, konumu tam olarak bilinen bir referans istasyonu bulunmaktadır ve bu referans istasyonu, mesafe ve saat hatalarını içeren bir düzeltme oluşturarak 50 kilometre içerisinde bulunan bir gezgin alıcıya gönderir, bunun yanında, düzeltmenin yapıldığı mesafe kısıtı göz önünde bulundurulursa; alıcı ve referans istasyonunun aynı uydu takımları ile etkileşimde olduğu söylenebilir, bu sayede; düzeltme verisi, iki alıcı için de ortak olan hataları elimine eder [Farrel ve Givargis, 2000].

DGPS yönteminde iki çeşit çözüm yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan biri 'Pozisyon alanı DGPS düzeltmesi', bir diğeri ise; 'Ölçüm Alanı DGPS Düzeltmesi' olarak adlandırılmıştır. Pozisyon alanı DGPS düzeltmesi' yönteminde, konumu tam olarak bilinen referans istasyonu, hataların enlem, boylam ve yükseklik cinsinden farklarını gezgin alıcıya gönderir ve alıcı da bu farkları kullanarak konum bilgisini hesaplar. Bir diğeri düzeltme yöntemi olan 'Ölçüm Alanı DGPS Düzeltmesi' metodunda ise koordinat düzeltmelerini kaydırmak yerine, direkt olarak uyduların uzaklık bilgilerine dair düzeltme verileri oluşturulup gezgin alıcıya gönderilir ve alıcı bu şekilde konum bilgisine ulaşır [Park, Lee, Kim, Yun ve Kee, 2013]. Bahsedilen düzeltme yöntemlerinin ilkinde, hata oranlarının koordinatlar cinsinden kaydırılması ile sonuca ulaşılırken, ikinci yöntemde; uyduların uzaklık düzeltmeleri kullanılarak sonuca ulaşılmaktadır. Ölçüm alanı DGPS düzeltme yönteminin daha kullanışlı olduğu söylenebilir çünkü; pozisyon alanının aksine, birbirinden farklı uydu takımlarının düzeltme bilgileri ile ölçüm yapılmasına olanak sağlamaktadır [Park, Lee, Kim, Yun ve Kee, 2013]. Ölçüm alanı DGPS düzeltme yönteminin bir görsel şeması Şek. 5'te verilmiştir.

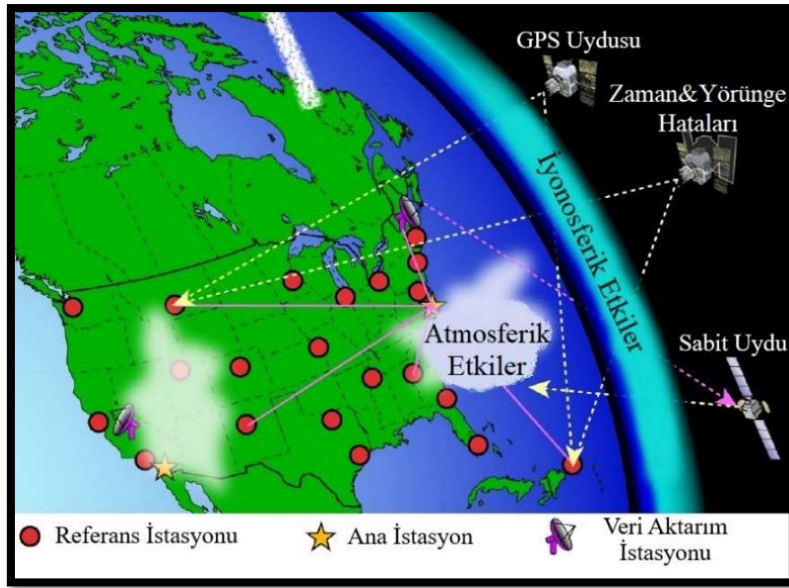


Şekil 5: Ölçüm alanı DGPS düzeltmesi [Park, Lee, Kim, Yun ve Kee, 2013].

Düzeltilme verilerinin iletiminde de bazı standartlar vardır. Bu standartların belirlenmesi için RTCM-SC104 Komitesi kurulmuştur. Bu komite, Diferansiyel GPS için gerekli düzeltme mesaj tiplerini belirli standartlar altında oluşturmuştur. Sistemin verdiği doğruluk oranı, kapsadığı alanlarda 10 metrenin altında iken, daha kaliteli alıcılar ve iyi koşullarda, bu

doğruluk oranının 30 santimetrenin altına düşmesi de mümkündür, bunun yanında, her 150 kilometrede, 1.5 metre kadar sapmanın arttığı söylenebilir [Hall, 1996].

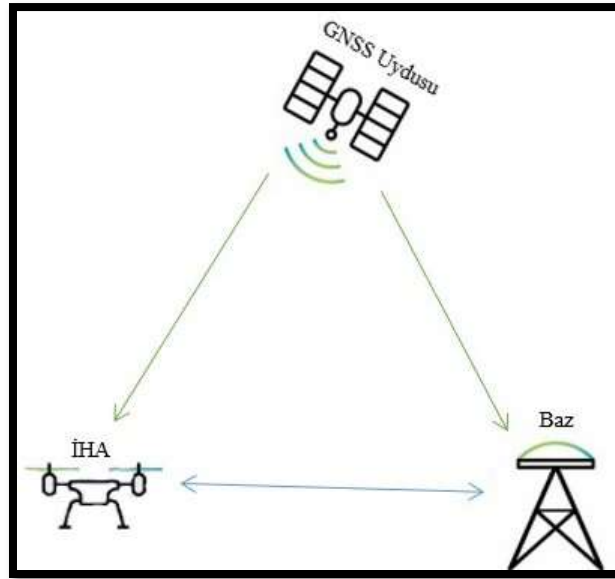
SBAS: Konum belirleme yöntemlerinden bir diğeri de daha çok havayolu işletmeleri tarafından veya havacılık uygulamalarında kullanılan SBAS(Satellite Based Augmentation System)'tir. Bu sistemde, yer konum belirleme sistemlerinin aksine daha geniş alanlara hizmet verilmektedir[Corrections, 2004] . SBAS'ın aktif olarak kullanımda olduğu örnekleri de mevcuttur. Operasyonel durumda olan bir kaç SBAS sistemi; Amerika Birleşik Devletleri'nde WAAS, Rusya'da SDCM, Avrupa'da EGNOS, Çin'de BDSBAS, Hindistan'da GAGAN ve Japonya'da MSAS olarak hizmet vermektedir[ESA-GMV, 2011]. Sistemin içerisinde, konumları bilinen yer istasyonları, bu yer istasyonlarının bağlı olduğu ana istasyonlar, uydu ile haberleşmede kullanılan veri aktarım istasyonları ve sabit uydular bulunmaktadır. Şek. 6'da, sistemin ABD'de kullanılan örneği WAAS'a ait bir görsel üzerinde bahsedilen tüm bu parçalar görülmektedir.



Şekil 6: WAAS şeması.[Walter, 2002].

RTK

GNSS sisteminin, yalnızca bir gezgin alıcıyla ya da daha çok bilinen adı olan GPS ile kullanımında görülen uydu sayısı arttıkça, açık arazide, konum bilgisi adına güzel sonuçlar verebildiği bilinen bir gerçektir. Ancak; kötü hava koşullarında veya sinyal ile alıcı arasında bir engel ile karşılaşıldığında, bu sonuçların ihmal edilemeyecek kadar zayıfladığı da göz ardı edilemez. Bu aşamada, RTK sistemlerinin kullanımı, bu sorunun çözümünde rol oynamaktadır.

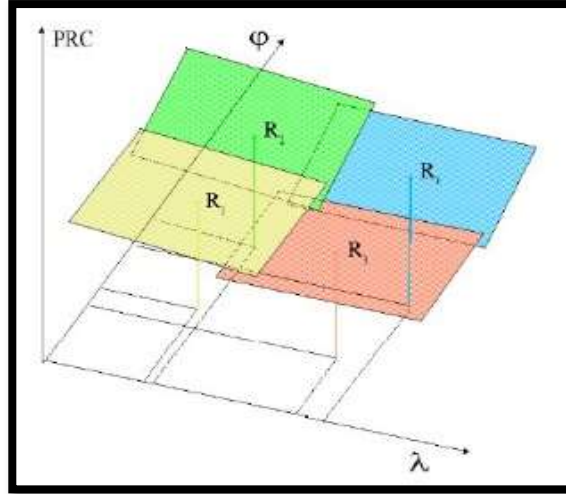


Şekil 7: RTK-GNSS uydusu ve gezgin alıcı şeması [Hex, 2020].

Yukarıda verilen Şek. 7'de RTK sisteminin çalışma prensibi şu şekilde özetlenebilir; GNSS uydusundan alınan sinyaller hem baza hem de gezgin alıcıya ulaşmaktadır, ilk olarak atmosferik etkiler, uyduların yörünge hataları ve uydularda bulunan zaman hataları, iki ayrı alıcı için de ortak olduğu için elimine edilir; bununla beraber daha keskin sonuçlar için taşıyıcı faz hesaplamaları yapılır, ardından baz içerisinde hesaplanan düzeltme verisi gezgin alıcıya ulaştırılır ve konum bilgisi hassas bir şekilde gerçek zamanlı olarak elde edilir[Hex, 2020].

Real Time Kinematics- RTK sisteminin uygulanma şekilleri çeşitlilik göstermektedir. Ölçüm sürelerinin kısaltmasınaadına gerekli görülen bölgelerde Ağ-RTK uygulamaları yapılmaktadır. Ağ-RTK uygulamalarının spesifik çözüm yöntemleri bulunmaktadır. Bu çözüm yöntemleri; FKP-Alan düzeltme yöntemi, VRS-Sanal referans istasyonları ve MAC-Master Auxiliary Concept yöntemi olarak 3'e ayrılır.

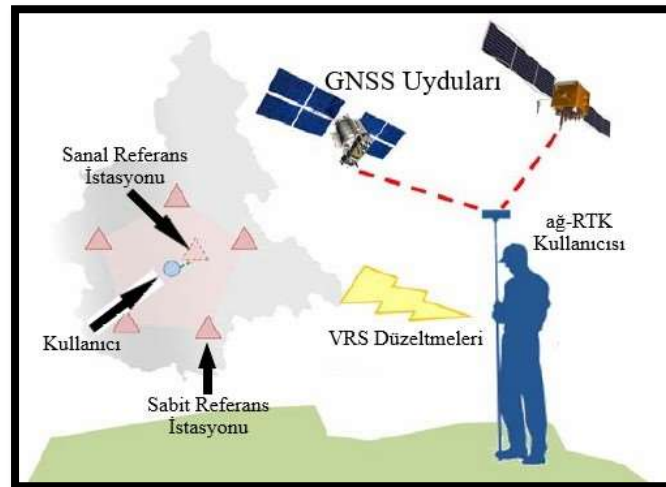
FKP-Alan Düzeltme Tekniği: FKP-Alan düzeltme metodu bir ağ-RTK düzeltme örneğidir ve bir Alman şirketi olan SAPOS Grup tarafından ortaya çıkarılmıştır[Pehlivan, Bezicioğlu ve Yılmaz, 2019]. Bu metotta, merkezinde referans istasyonları konumlandırılmış, geometrik, İyonosferik ve troposferik düzeltmelerin oluşturduğu yatay gradyanlardan oluşan düzeltme alanları mevcuttur[Wübenna, Bagge ve Schmitz, 2001]. Bu alanların şematik gösterimi Şek. 8'de verilmiştir.



Şekil 8: FKP-Düzeltilme alanları[Wübenna, Bagge ve Schmitz, 2001].

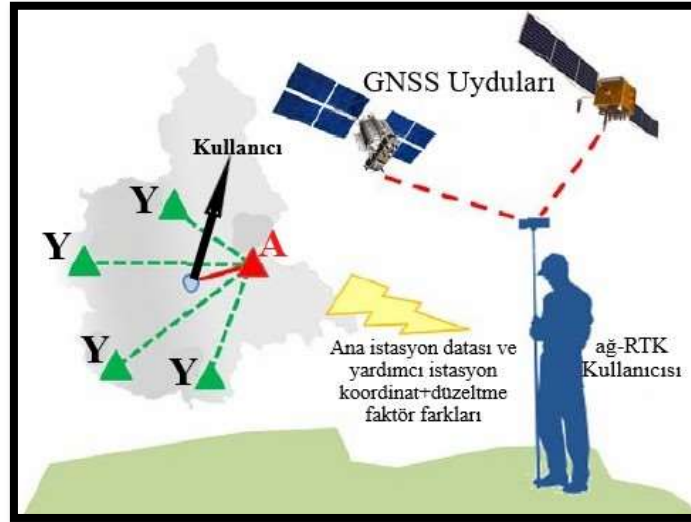
Bu düzeltme metodunda, gezgin alıcının koordinat bilgisini paylaşmasına ihtiyaç olmadığından; tek yönlü alıcılar ile ağdan ayrı olarak, en yakın referans bazının verileri ile düzeltme yapılması mümkündür ancak; çok tercih edilmez; ağ-RTK avantajını kullanmak amacıyla, çift yönlü alıcılar kullanılarak referans bazı kontrol merkezi seçilir ve kontrol merkezi ile daha efektif bir düzeltme yapılır[Yıldırım, Mekik ve Bakıcı, 2011].

VRS-Sanal Referans İstasyonları: Bir diğer düzeltme yöntemi de VRS-Sanal referans istasyon(Virtual Reference Station) tekniğidir. Bu yöntemin şematize edilmiş gösterimi Şek. 9'da verilmiştir. Bu yöntem, ağ-RTK düzeltme örneklerinden en eski ve en kolay yöntemdir[Dabove, De Agostino ve Manzano, 2012]. VRS dünya çapında en çok kullanılan ağ-RTK düzeltme yöntemi olmakla beraber, sabit kullanıcılar için diğer düzeltme yöntemlerinden daha başarılı bir konum belirleme işlemi yapılmasına olanak sunar[Pehlivan, Bezicioğlu ve Yılmaz, 2019]. VRS tekniğinde öncelikle gezgin alıcı çift yönlü haberleşme yetisi ile kendi konum bilgisini kontrol merkezine bildirir, bunun ardından kontrol merkezi aracılığıyla, gezgin alıcı civarına bir sanal bir referans bazı atanır ve ağ-RTK sisteminin tamamından toplanan gerekli düzeltme faktörleri, bu sanal referans bazı aracılığı ile gezgin alıcıya gönderilir[İnal, Bülbül ve Yıldırım, 2014]. Bu düzeltme faktörünü kullanarak gezgin alıcı konumunu santimetre hassasiyetinde hesaplar.



Şekil 9: VRS-Sanal referans istasyonu düzeltme şeması [Dabove, De Agostino ve Manzano, 2012].

MAC Tekniği: Son olarak ağ-RTK düzeltme yöntemlerinde MAC-Master Auxiliary Concept düzeltme yönteminden bahsedilebilir. MAC düzeltme yönteminde bir ana istasyon ve yardımcı istasyonlar mevcuttur. İstasyonların ana istasyon ve yardımcı istasyonlar olarak ayrılmasında temel sebep, haberleşmede kullanılan hacmin daha efektif kullanılmasıdır[Yıldırım, Mekik ve Bakıcı, 2011]. Ana istasyon 'A' ile, yardımcı istasyonlar ise 'Y' ile Şek. 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10: MAC-Master Auxiliary Concept düzeltme şeması[Dabove, De Agostino ve Manzano, 2012].

Konum belirleme işlemi, ana istasyonun kendi koordinat bilgilerini ve hata düzeltme faktörlerini, bunun yanında; yardımcı istasyonların da koordinat ve düzeltme farklarını gezgin alıcıya göndermesi ile yapılır[Dabove, De Agostino ve Manzano, 2012]. Gezgin alıcı, bu verileri kullanarak santimetre hassasiyetinde konumunu hesaplayabilir.

TUSAGA-Aktif(Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı-Aktif)

Ağ-RTK uygulamalarının çok yaygın olduğu bilinmektedir. Bu uygulamaların yaygınlaşmasında etkili olan birçok unsur bulunmaktadır. Bu unsurlar hakkında kısaca örnekler vermek gerekirse; ülke kapsamında yapılan kadastral ölçümler haritalama işlemlerinin süresinin ve ekonomik maliyetinin azaltılması, kıtasal hareketlerinin anlık takibi, konum hassasiyeti isteyen hareketli araçların navigasyon işlemleri ve atmosferin detaylı modellenmesi ile keskin hava durumu kestirimleri yapılması gibi artılar örnek olarak verilebilir[Uzel ve Eren, 2006]. Ülkemiz için yapılan uygulama TUSAGA- Aktif(Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı-Aktif) olarak isimlendirilmiştir. TUSAGA-Aktif projesi Mayıs 2006'da İstanbul Kültür Üniversitesi tarafından, TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) sponsorluğunda Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü ve Harita Genel Komutanlığı hizmeti için yürütülmüş olup Aralık 2008 tarihinde tamamlanmıştır[Eren, Uzel, Gulal, Yıldırım ve Cingöz, 2009]. Bununla beraber, yukarıda anlatılan çözüm yöntemleri TUSAGA-Aktif hizmetinde kullanıcıya daha iyi hizmet verebilmek adına etkin olarak kullanılmaktadır. TUSAGA-Aktif, Türkiye ve K.K.T.C. için her 70 ile 100 kilometrede bir konumlandırılmış, toplamda 146 adet referans bazı ve bir kontrol merkezi ile her gün 24 saat, RTK GPS pozisyon yayını yapmaktadır[Eker, Alkan ve Aydın, 2020]. Tüm bu düzeltme yayınları NTRIP, GSM veya GPRS yayınlarından uygun olanlar ile RTCM formatında alıcılara yayınlanmaktadır[Yıldırım, Mekik ve Bakıcı, 2011].

TARİH	Doğruluk	Sağa (m)	Yukarı (m)	Yükseklik (m)
Eylül 2014	Toplam Ölçüm Sayısı	723	723	723
	Karesel Ortalama Hata	0.0449	0.0394	0.0780
Eylül 2016	Toplam Ölçüm Sayısı	697	697	697
	Karesel Ortalama Hata	0.0286	0.0282	0.0456

Tablo 1: TUSAGA-Aktif hassasiyet gelişim verileri[Ergüner, 2017].

Sistemin gelişimi ve doğruluğu açısından bir kıyas yapıldığında Tablo 1’de verilen Eylül 2014 ve 2016 verileri karşılaştırılırsa, hata oranlarının koordinat ekseninde yarı-yarıya azaldığı görülmektedir[Ergüner, 2017]. Günümüz için, bu verilere ek olarak, tek yönlü veri akışına sahip gezgin alıcılarda DGPS yöntemi ile; 1 metre veya daha altı, çift yönlü veri akışı olan alıcılarda ise RTK düzeltme yöntemleriyle; 1 ile 10 santimetre aralığında ölçüm hassasiyetine ulaşılabilmektedir[Yıldırım, Mekik ve Bakıcı, 2011].

RTCM Veri İletim Formatı

Dünya üzerinde birçok kişi veya kuruluş konum belirleme işlemi yapma çabasında bulunmaktadır. Tüm bu çalışmaların ortak çabası; daha kısa sürede hatta gerçek zamanlı olarak, daha hassas konum belirleme işleminin gerçekleşmesidir. Bu süreçte, tüm bu çalışmalarda ortaya çıkan bu ürünlerin uyumlu çalışması beklenmektedir. Bunun mümkün olması için bir kuruluşun ortaya çıkması ve tüm bu çalışmalarda kullanılan mesaj tiplerinin standardize etmesi gerekti. Gerekli ihtiyacın giderilmesi üzerine RTCM SC-104 (Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee-104) komitesi kuruldu. Mesaj tiplerine kendi adını verdiği ve ihtiyaca göre güncellemeler ile desteklediği RTCM ile isimlendirdi. RTCM formatında mesajlar binary kod olarak gönderilir, alıcıların haberleşmesi amacıyla kullanılır ve gerçek zamanlı konum belirleme işlemlerinde kullanılır[Pırtı ve Kurtulgu, 2021]. RTCM formatında sürümlere değinmek gerekirse; başlangıç sürümü olarak RTCM 2.0 ile başlamış olup RTCM 2.1, 2.2, 2.3, 3.0, 3.1 ve RTCM SAPOS sürümleri ile devam etmiştir. RTCM 2.0 mesaj bilgileri ve içerikleri, Tablo 2’de verilmiştir. Tablodan anlaşılacağı üzere öncelikle DGPS düzeltme mesajlarını içeren bu sürümde, amaç DGPS ile konum belirlemeye çalışan kullanıcıların koddüzeltilmesi ihtiyacını karşılamaktır.

Mesaj Türü	İçerik
1	Diferansiyel GPS düzeltmeleri (kod ölçüsü ve hız, max. 12 uydu için)
2	Delta diferansiyel GPS düzeltmeleri (bir önceki yörünge veri kayıtları, max. 12 uydu için)
3	GPS referans istasyonu koordinatları (ECEF X,Y,Z)
4	Referans istasyonu datumu
5	GPS uyduları işlevsellik (sağlık) durumu
6	GPS "Null Frame" bilgisi
7	DGPS radio-beacon istasyonu almanak bilgisi
8	Pseudolite (yalancı uydu) almanak
9	GPS kısmi düzeltme değerleri
10	P-kod diferansiyel düzeltmeleri
11	C/A-kod L1,L2 delta düzeltmeleri
12	Pseudolite (yalancı uydu) istasyon parametreleri
13	Yer verici iletim parametreleri
14	GPS haftası zaman bilgisi
15	İyonosferik gecikme mesajı
16	GPS özel mesajı (max. 90 karakter uzunluğunda ASCII text)
17	GPS yörünge bilgileri (efemeris)
22	Kapsamlı iyileştirilmiş referans istasyonu parametreleri
27	Kapsamlı iyileştirilmiş DGPS radio-beacon istasyonu almanak bilgisi
59	Sisteme ilişkin özel mesajlar (gerekli veri iletimi için)
60...63	Çok amaçlı kullanım

Tablo 2: RTCM 2.0 formatı mesaj türleri ve içerikleri[Öcalan ve Soycan, 2011].

2.0 sürümünün ardından Tablo 3'te görülen mesaj tipleri eklenerek RTCM 2.1 sürümü ortaya çıkarıldı. Bu sürümde tablodan da anlaşılacağı üzere, RTK ile konum belirleme işlemleri için ilk adım atılmış olup düzeltilmemiş taşıyıcı faz ölçüsü, düzeltilmemiş kod ölçüsü, taşıyıcı faz düzeltmeleri ve kod düzeltmeleri RTCM formatının mesaj içeriklerikısına 18-19-20 ve 21 numaralı mesaj türleri ile dahil edilmiştir.

Mesaj Türü	İçerik
18	RTK için düzeltilmemiş taşıyıcı faz ölçüsü (raw carrier phase data)
19	RTK için düzeltilmemiş kod ölçüsü (raw code data)
20	RTK taşıyıcı faz düzeltmeleri
21	RTK kod düzeltmeleri

Tablo 3: RTCM 2.1 formatı mesaj türleri ve içerikleri[Öcalan ve Soycan, 2011].

Bir sonraki güncelleme ile ortaya çıkan RTCM 2.2 sürümünde eklenen mesaj içerikler Tablo 4'te verilmiştir.

Mesaj Türü	İçerik
31	Diferansiyel GLONASS kod düzeltmeleri
32	GLONASS referans istasyonu koordinatı (ECEF X,Y,Z)
33	GLONASS uyduları işlevsellik (sağlık) durumu
34	GLONASS kısmi diferansiyel düzeltme değerleri ($N > 1$) GLONASS "Null Frame" bilgisi ($N \leq 1$)
35	GLONASS radio-beacon almanak bilgisi
36	GLONASS özel mesajı (max. 90 karakter uzunluğunda ASCII text)
37	GNSS sistemi zaman kayıklığı

Tablo 4: RTCM 2.2 formatı mesaj türleri ve içerikleri[Öcalan ve Soycan, 2011].

Mesaj türlerinin içeriğine bakıldığında, anlaşıldığı üzere, daha önce sadece tek bir uydu takımından yararlanılarak oluşturulan düzeltme bilgilerine, Rusya'nın kurmuş olduğu GLONASS uydu takımından gelen düzeltme bilgileri de eklenmiştir. RTCM 2 sürümlerinin sonuncusu olan 2.3 sürümünü inceleyecek olursak 23-24 ve 27 nolu mesaj türlerinin eklenmesiyle ortaya çıkmıştır. Anten tanımı, anten referans nokta koordinatları ve kapsamlı iyileştirilmiş DGPS radyosinyal verici istasyonu almanak bilgisi mesaj içerikleri ile güncellenmiştir. Tüm bu güncellemeler Tablo 5'te düzenli olarak verilmiştir.

Mesaj Türü	İçerik
23	Anten tanımı
24	Referans istasyonu anten referans noktası (ARP) koordinatları
27	Kapsamlı iyileştirilmiş DGPS radyo sinyali verici istasyonu almanak bilgisi

Tablo 5: RTCM 2.3 formatı mesaj türleri ve içerikleri[Öcalan ve Soycan, 2011].

RTCM 2 sürümlerinin eksiklikleri bulunmaktadır. Bu eksiklikler bant genişliğinin yetersiz kullanımından, mesajların birbirine bağımlı olmasından ve yeni eklenen uydu takımlarının düzeltme verilerinin eklenmesi için uygun bir yapı içermemesinden kaynaklanmaktadır. Tüm bunlara rağmen dünya çapında DGPS ve tek bazlı RTK uygulamaları için yüksek miktarda kullanıcı sayısına sahiptir[Heo, Yan, Lim ve Rizos, 2009]. Bu eksikliklerin aşılması amacıyla RTCM 3 formatı, belirgin değişiklikler yapılarak ortaya çıkarılmıştır. Öncelikle RTCM 3.0 ardından 3.1 sürümleri hazırlanmıştır. RTCM 3.0 formatı ile düzenlenen mesaj türleri ve içerikleri Tablo 6'da verilmiştir. Tablodan anlaşılacağı üzere, mesajlar kategorize edilerek gruplar halinde toplanmıştır. Bu düzenleme ile beraber bant genişliği kullanımında etkin bir azalma gerçekleşmektedir ve verim artmaktadır.

	Mesaj Türü	İçerik
GPS Gözlemleri	1001	L1 GPS RTK gözlemleri
	1002	Genişletilmiş L1 uydu gürültü sinyali GPS RTK gözlemleri (CNR).
	1003	L1 ve L2 GPS RTK gözlemleri
	1004	Genişletilmiş L1 ve L2 uydu gürültü sinyalleri GPS RTK gözlemleri (CNR).
Sabit Anten Referans Noktası Koordinatları	1005	Sabit RTK referans istasyonu ARP koordinatları, ECEF XYZ
	1006	Anten yüksekliği ile sabit RTK referans istasyonu ARP koordinatları
Anten Tanımları	1007	Anten tanımlayıcı
	1008	Anten tanımlayıcı ve anten seri numara bilgisi
GLONASS Gözlemleri	1009	L1 GLONASS RTK gözlemleri
	1010	Genişletilmiş L1 uydu gürültü sinyali GLONASS RTK gözlemleri (CNR).
	1011	L1 ve L2 GLONASS RTK gözlemleri
	1012	Genişletilmiş L1 ve L2 uydu gürültü sinyalleri GLONASS RTK gözlemleri (CNR).

Tablo 6: RTCM 3.0 formatı ile gelen mesaj türleri ve içerikleri[Heo, Yan, Lim ve Rizos, 2009].

RTCM 3.1 formatı ile gelen mesaj türleri ve içerikleri verilen Tablo 7’de toplanmıştır. Bu tabloda görülen düzeltme parametreleri, ağ-RTK sistemlerinde kullanılan matematiksel modellerde kullanılması amaçlanmış olup yaşanan sistematik hataların düzeltilmesinde önemli rol oynamaktadır[Öcalan ve Soyca, 2011].

	Mesaj Türü	İçerik
Dönüşüm Mesajları	1021	Helmert : kısaltılmış Molodensky dönüşüm parametreleri
	1022	Molodenski-Badekas dönüşüm parametreleri
	1023	Dönüşüm artık mesajı, elipsoit ızgara gösterimi
	1024	Dönüşüm artık mesajı, düzlem ızgara gösterimi
	1025	Projeksiyon parametreleri, LCC2SP, OM dışındaki türler
	1026	Projeksiyon parametreleri, tip LCC2SP (Lambert Conic Conformal)
	1027	Projeksiyon parametreleri, OM tipi (Oblique Mercator)
	1028	Küreselden plakaya sabit dönüşüm için ayrılmıştır.
Diğer Mesajlar	1030	GPS ağı-RTK artıkları mesajı
	1031	GLONASS ağı-RTK artıkları mesajı
	1032	Fiziksel referans istasyonu konum mesajı
	1033	Anten ve alıcı tanımlayıcı için alıcı

Tablo 7: RTCM 3.1 formatı ile gelen mesaj türleri ve içerikleri[Heo, Yan, Lim ve Rizos, 2009].

Bunların yanında, son olarak eklenen RTCM SAPOS güncellemesinde, ağ-RTK uygulamalarında kullanılan metotlardan biri olan, FKP metodunun ihtiyaç duyduğu mesaj içeriği eklenmiştir[Wübenna ve Bagge, 2002].

Kaynaklar

Bu projede, insansız hava araçları üzerinde RTK ve GNSS uygulamaları üzerine, çeşitli testler ve uygulamalar yapılmıştır. Bu uygulamalar ve testler sırasında çeşitli cihazlar ve kaynaklar kullanılmıştır. Bu kısımda bu cihazlar ve kaynakların detaylarına değinilmiştir. Projenin amacına ulaşabilmesi adına, uygulamaların insansız hava araçları üzerinde yapılması gerekmektedir. Amacına uygun olarak proje için üretilen insansız hava aracının görseli Şek. 11 üzerinde verilmiştir.



Şekil 11: Omnibus F4 V3S entegre F450 insansız hava aracı.

Şek. 3 üzerinde verilen insansız hava aracının tüm bileşenleri bu kısımda anlatılmıştır. Öncelikle, DJI şirketinin tasarlamış olduğu F450 tipi iskelet edinilmiştir. Bu iskelet üzerine hava aracının tüm elektronik bileşenleri entegre edilerek testlerin sürdürülmesi hedeflenmiştir. Bu araç üzerine, Omnibus F4 V3S modelinde ArduPilot yazılımı ile hazırlanmış olan uçuş kontrolcüsü entegre edilmiştir. Buna ek olarak araç için seçilen motor modeli yine DJI şirketinin ürettiği 2212 920 kV Fırçasız DC motordur. Bu motordan hava aracımız için 4 adet temin edilmiştir. Devamında, motorlara uygun 4 adet olmak üzere, yedeklerle beraber totalde 8 adet pervane kullanılmıştır. Bir diğer gerekli bileşen olan elektronik hız kontrolcüsü için DJI şirketinin ürettiği E300 modelinden, 4 adet temin edilmiştir. Bunun yanında, yer kontrol istasyonunun gerçek zamanlı olarak uçuş verilerini takip edebilmesi ve kontrol edebilmesi için HolyBro modelindeki telemetri cihazı, insansız hava aracına monte edilmiştir. Uçuşun kontrolünün pilot tarafından sağlanabilmesi amacıyla FlySky i6X RC modelindeki kumanda seçilmiş ve alıcısı insansız hava aracına entegre edilmiştir. Bunların dışında, çalışmanın odak noktası olan konum belirleme cihazının temini gerçekleştirilmiştir. RTK sisteminin kullanıldığı uçuşlarda kullanılmak üzere kullanımı karar kılınan cihaz, Here+RTK GNSS modülü olmuştur ve temin edilmiştir. Tablo 8'de kısaca fonksiyonları ile verilmiştir.

Komponent	Fonksiyon
Motor	Motorlar, pervanelerin dönmesini sağlar ve gerekli kaldırmayı sağlar. Bu projede DJI 2212 920 kV Fırçasız DC Motor modeli kullanılmıştır.
Pervane	Spesifik şekilleri ile döngüleri sırasında hava hareketi ile kaldırma kuvveti oluştururlar. Bu projede yarıçapı 12 cm olan 4 adet pervane kullanılmıştır.
Uçuş Kontrolcüsü	İçerdiği sensörler ve yazılım aracılığıyla uçuşun gerçekleşmesini sağlar. Bu projede Omnibus F4 V3S modeli kullanılmıştır.
Elektronik Hız Kontrolcüsü	Girişe bağlı olarak motora gidecek enerji miktarını ayarlamak için elektronik hız kontrol cihazı (ESC) kullanılmıştır. Bu projede kullanılmak üzere DJI'nin E300 modeli seçilmiştir.
Batarya	İnsansız Hava Aracının güç kaynağıdır. Bu proje için 3300 mAh kapasiteli, 40C deşarj hızına sahip, 4 seri ve 1 paralel hücre konfigürasyonu ile 14.8 Volt pil uygun görüldü. Pilin konektör kısmında XT60 dişi konektör bulunmaktadır.
İskelet	Alt ve üst olmak üzere 2 adet Güç Dağıtım Panosu (PDB) ve 4 Kol kullanılarak oluşturulmuştur. Yukarıda sayılan bileşenlerin bir arada ve sabit olduğu kısımdır.
Telemetri	Yer kontrol istasyonu ile insansız hava aracı arasında gerçek zamanlı veri aktarımını sağlar. Bu kısımda Holybro radyo telemetri cihazının kullanımı uygun görülmüştür.
Kumanda	Uçuşun pilot tarafından yönetilmesini sağlar. Bu projede FlySky i6X RC modelindeki kumanda kullanılmıştır.
GPS Alıcı	Here+V2 modelindeki RTK sisteminin gezgin alıcı tarafı insansız hava aracına entegre edilmiştir.

Tablo 8: İnsansız Hava Aracının Bileşenleri.

Bu modülün içerisinde, bir adet baz, bir adet baza ait anten ve bir adet de gezgin alıcı bulunmaktadır. Gezgin alıcı tüm testlerde insansız hava aracı üzerinde bulunacaktır. RTK'lı testlerde baz modülü yer kontrol istasyonuna bağlanarak aktifleştirilecektir. Bunun dışında RTK'sız testlerde ise baz modülünün aktivasyonu yapılmadan uçuşlar yapılacaktır. Ek olarak projeye, devamında bir RaspberryPi cihazı temin edilmiştir. Bu cihazın temin edilmesindeki amaç; uzun süren baz konum belirleme işlemi esnasında değerli ekipmanın dışarıda bırakılmaması, bağlantı kablosunun getirdiği hareket kısıtının ortadan kaldırılması ve RTK modülünün, çoklu araca düzeltme verisi yollayabilmesidir. Bu durum, RaspberryPi içerisinde, UDP server yayını yapan bir Python betiği derlenerek sağlanmıştır. Belirlenen IP ve Port üzerinden çoklu cihazların kablosuz olarak düzeltme verisi alması mümkün kılınmıştır. IP-67 sertifikalı 28x28x12 cm boyutlarında birkutu, sistemin, her türlü hava koşulunda, içerisinde güvenle çalışabilmesi için temin edilmiştir.

Here+RTK

Projede kullanılan RTK modülü, HEX ve ArduPilot takımının beraber ürettiği Here+RTK kitidir. Kit Şek. 12'de verilmiştir. Bu RTK sistemi ArduPilot yer kontrol istasyon programı ile uyumlu çalışmaktadır. Here+RTK kullanılmadan önce bir sürüm güncellemesi ihtiyacı duymaktadır. İçerisinde 1.10 seri numaralı sürüm ile gelen bu cihaz, U-Center uygulaması aracılığı ile 1.30 sürümüne yükseltilmiştir. Ardından, U-Center uygulaması üzerinde, gerekli ayarlar konfigüre edilip cihazın kullanıma hazır hale gelmesi sağlanmıştır. Cihaz

kullanıma hazır hale geldiğinde, bazın kullanılabilmesi için, konumu tam olarak bilinen bir noktaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle Here+ bazı ve anteni uygun bir şekilde kurulup "Survey" yani konum belirleme işlemine başlanmıştır. Bu kurulum esnasında bazdan çıkan USB portu bilgisayara takılmıştır ve U-Center uygulaması ile bağlantısı yapılmıştır. Aynı zamanda bazın anteni de konumu bilinmesi gereken nokta üzerinde sabitlenmiştir. Tüm ayarlar yapıldığında, U-Center üzerinde survey işlemi başlatılmıştır.



Şekil 12: Here+RTK kiti[PX4, 2021].

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

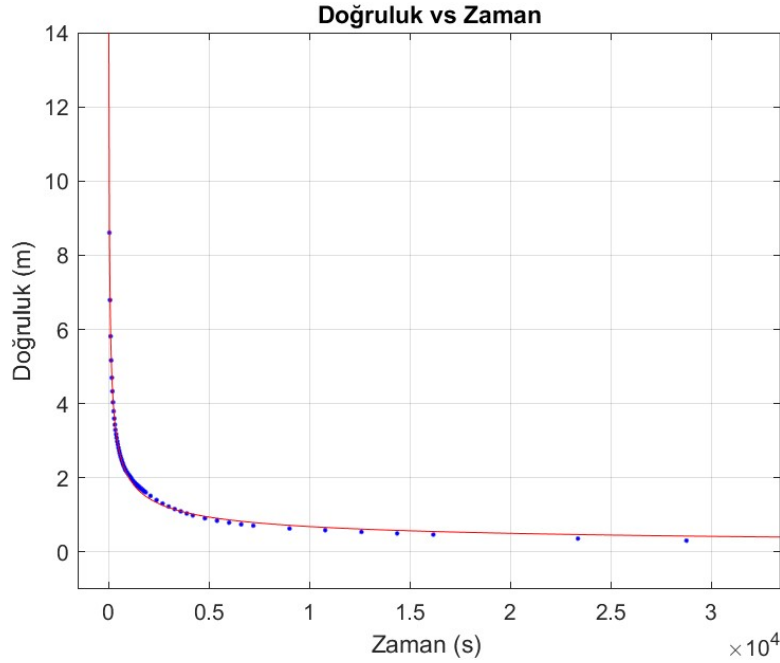
RTK Baz İstasyon Kutusu

Proje kapsamında bir ürün ortaya çıkarmak amacıyla ve RTK bazının daha kullanışlı olması için kablosuz haberleşme ile çalışan bir RTK Baz İstasyonu tasarlanmıştır. Haberleşmesini bir RaspberryPi (RPi) aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Bu RPi içerisinde python yazılım dilinde bir UDP haberleşme betiği koşturulmakta ve bir modem yardımı ile uygun menzilde ana bilgisayar ile haberleştirilmektedir. Kutu IP67 sertifikasına sahip olduğu için her türlü hava koşulunda kullanılabilir. Tasarlanan bu kutunun iç dizaynı Şek. 13'te verilmiştir.



Şekil 13: RTK baz istasyonu iç dizaynı.

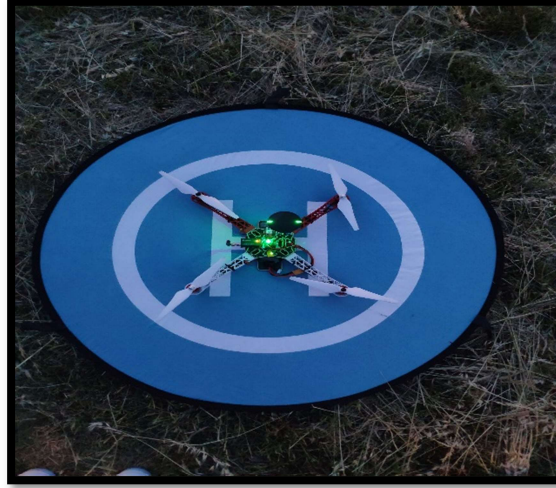
Tasarlanan RTK Baz istasyonu kutusu gerekli konum hassasiyetine ulaşabilmek amacıyla 10 gün süreyle açık alanda ölçüm yapmak üzere bırakılmıştır. Bu sürenin sonunda ulaşılan hassasiyet miktarı 6.25 santimetre seviyesindedir. Normal şartlarda beklenen 1 santimetre hassasiyet değerine ulaşılması için yeterli süre olmadığından, bu hassasiyet durumunda survey tamamlanmış olup testlere devam edilmiştir. Ayrıca survey süresi boyunca takip edilen zaman-doğruluk değerleri Şek. 14'te verilen grafiğe aktarılmıştır.



Şekil 14: RTK Survey'inin zamana göre doğruluk değişimi.

Test Senaryoları ve Koşulları

Bu senaryolar 3'e ayrılmıştır. İlk kısımda, en zorlayıcı senaryo olarak; iç mekân testleri yapılmıştır. Bu testlerde, insansız hava aracı RTK sistemi ile 3 defa ve RTK sistemi olmadan 3 defa olmak üzere 6 kez bir çizgi üzerinde hareket ettirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Burada amaç, düzeltmelerin bu kadar zorlayıcı bir çevrede nasıl bir etki göstereceğini kestirmektir. Bunun ardından, ikinci kısımda, doğal ortamda yaşanabilecek sorunlar-engeller gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Doğal ortamda karşılaşılan en yaygın engel olarak ağaçlar aklımıza gelmektedir. Bu senaryoda etrafı ve üstü ağaçlarla kaplı düz bir çizgi üzerinde 3'er defa ayrı ayrı olmak üzere insansız hava aracı üzerinde RTK'lı ve RTK'sız uçuşlar yapılmıştır. Son olarak 3. Kısımda açık alanda RTK sisteminin RTK'sız sisteme göre avantaj sağlayıp sağlamadığı test edilmiştir. Bu senaryoda insansız hava aracı engelsiz bir çevrede 3 defa RTK'lı 3'defa da RTK'sız olmak üzere 6 defa belirgin bir rota üzerinde otonom uçuş yaptırılmıştır. Bu uçuşların GPS verileri, MATLAB programı üzerinde grafikler halinde ile çizdirilmiştir. Bunun yanında uçuş başarısını gösterebilmek üzere, testin başlangıcında insansız hava aracının kalkış yaptığı noktaya geri inmesi komutu verilmiş ve indiği nokta ile kalktığı nokta arasındaki değişim gösterilmek üzere kayıt altına alınmıştır. Bu başlangıç durumunun görseli Şek. 15 üzerinde verilmiştir. Tüm testlerde aynı noktadan aynı durum ile uçuşlara başlanmıştır. Bu testlerin sonuçları da aşağıda verilen grafikler ile eklenmiştir. Grafiklere ek olarak bir iniş-kalkış noktası belirlenmiş ve her testten sonra bu kalkış noktasına iniş başarısı, fotoğraflarla kayıt altına alınmıştır.



Şekil 15: Başlangıç durumu.

Yapılan testler sırasında hava koşullarının da önem arz ettiği bilinmektedir. Bu nedenle testler sırasında hava koşulları olarak kaydedilmiş olup Tablo 9'da verilmiştir.

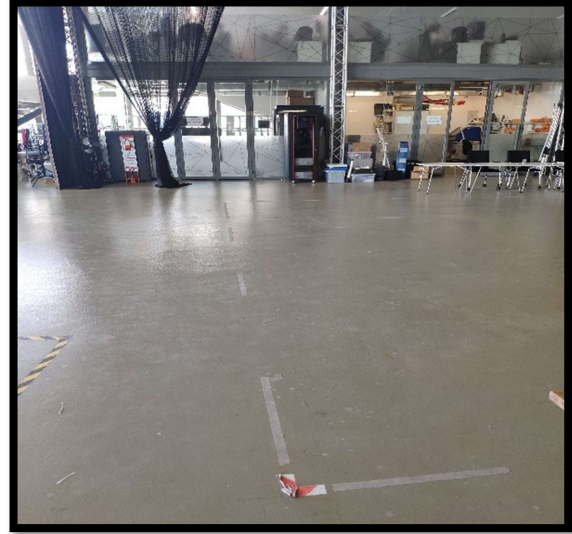
Konum: İ.T.Ü Maslak Yerleşkesi İstanbul						
Anlık Durum: 24 Mayıs 2022						
<i>Sıcaklık</i>	<i>Durum</i>	<i>Yağış</i>	<i>Nem</i>	<i>Rüzgar Hızı (km/saat)</i>	<i>A. Basınç</i>	<i>D.İ. Basınç</i>
18	Açık	0	%58	5 km/saat	1013.6 hPa	1022.9 hPa

Tablo 9: Testlerin gerçekleştirildiği hava koşulları.

Son olarak her test senaryosu için ayrı ayrı uygun mekanlar belirlenmiştir. Bu mekanlar, içerdikleri engellere göre seçilmiş olup aşağıda resimlerle gösterilmiştir. İlk olarak, en ekstrem test olarak nitelendirilebileceğimiz, iç mekân testlerimizin uygulanma yeri olarak aşağıda verilen, epey yansıtıcı yüzeylerle kaplı binanın uygun görüldüğünü söyleyebiliriz. Binanın dıştan görünümü Şek. 16'da içte takip edilen çizgi ise Şek. 17'de verilmiştir.

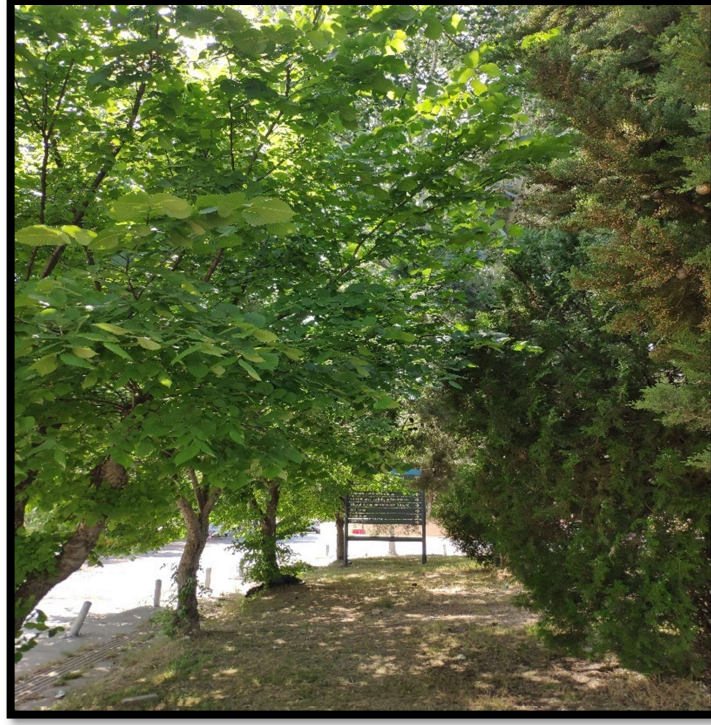


Şekil 16: İç mekân bina dış görünüm.



Şekil 17: İç mekân bina iç görünüm.

İkinci olarak, ağaçların engel teşkil ettiği senaryonun uygulanma alanı Şek. 18’de verilmiştir.

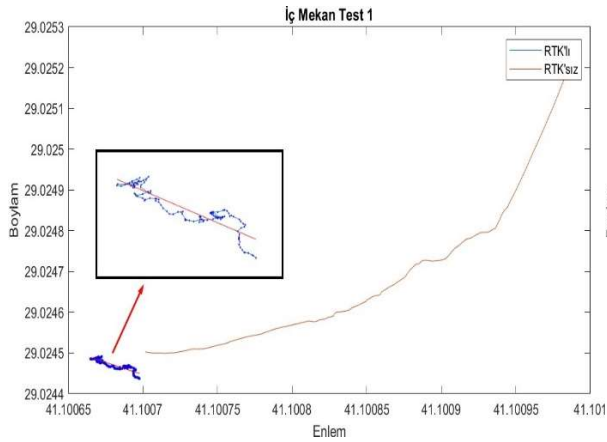


Şekil 18: Ağaçlı testlerin uygulanma yeri.

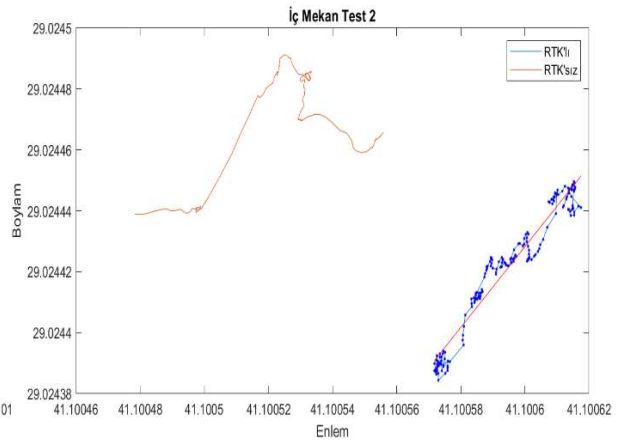
Son olarak açık mekân testlerinden bahsetmek gerekirse; uçuşa elverişli bir ortamda, engel bulunmadan bir açık alan seçilmiş olup testler sürdürülmüştür.

Test Sonuçları

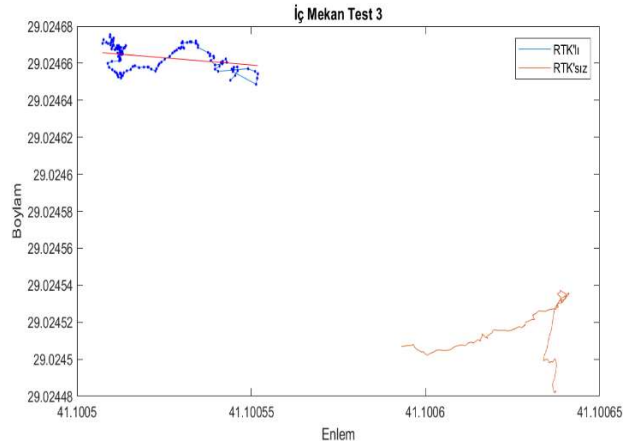
İlk olarak, iç mekân testlerinin sonuçları aşağıda, Şek. 19, Şek. 20 ve Şek 21’de sıralı olarak verilmiştir.



Şekil 19: İç mekân 1. Test sonuçları.



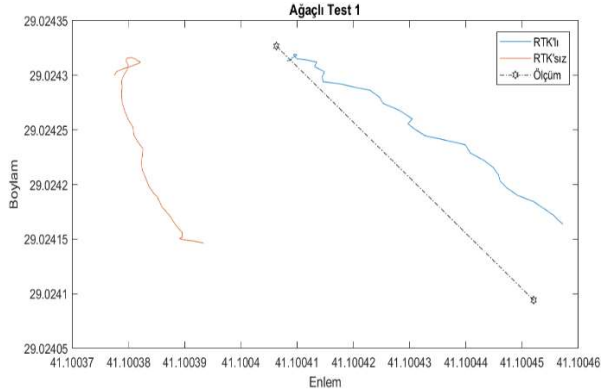
Şekil 20: İç mekân 2. Test sonuçları.



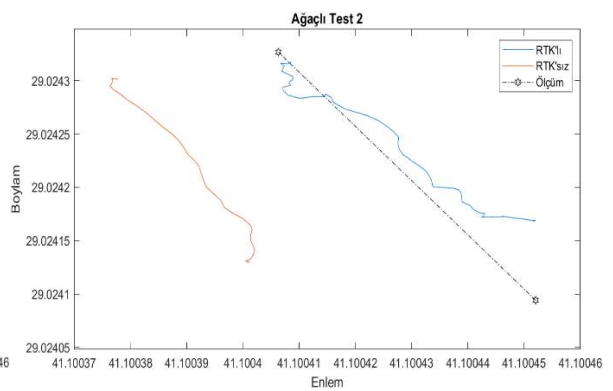
Şekil 21: İç mekân 3. Test sonuçları.

Yukarıda verilen 3 grafikte verilen test sonuçları yorumlandığında, zorlayıcı bir iç mekân durumunun, RTK sisteminin başarısını hatırı sayılır derecede azaltıyor olduğu görülmektedir. Yalnızca GPS'in kullanıldığı durumlarda oluşan kaymanın hem enlem hem de boylam doğrultusunda gerçekleştiği görülürken, RTK sisteminin bulunduğu testlerde, insansız hava aracının düz bir doğrultuda gidiyor olduğunun farkında olduğu fark edilmektedir. Bu durum, veriler üzerine uydurulan eğrilerden de kolayca görülebilmektedir. Her ne kadar bu tip ekstrem durumlar için iki tip konum belirleme yöntemi de uygun görülmesine de RTK'li sistemin, en azından hareketi anlamlandırabilme yetisi bu kısımda öne çıkmıştır.

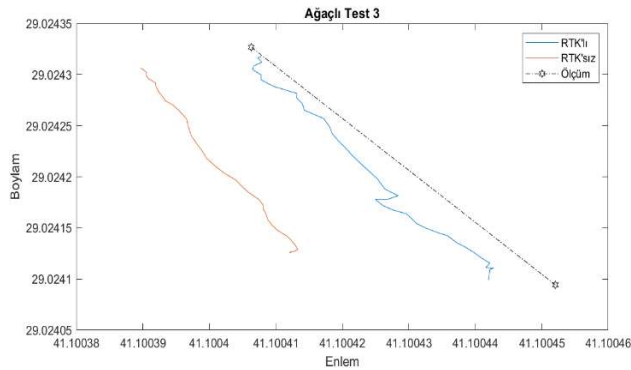
Devamında, ağaçlı mekân testlerinin sonuçları da Şek. 22, Şek. 23 ve Şek. 24' te olmak üzere, sıralı bir şekilde aşağıda verilmiştir. Sonuçların daha iyi analiz edilebilmesi amacıyla düz çizgi-rota, başı ve sonu hassas bir şekilde ölçülerek grafiklere eklenmiştir.



Şekil 22: Ağaçlı 1. Test sonuçları.



Şekil 23: Ağaçlı 2. Test sonuçları.

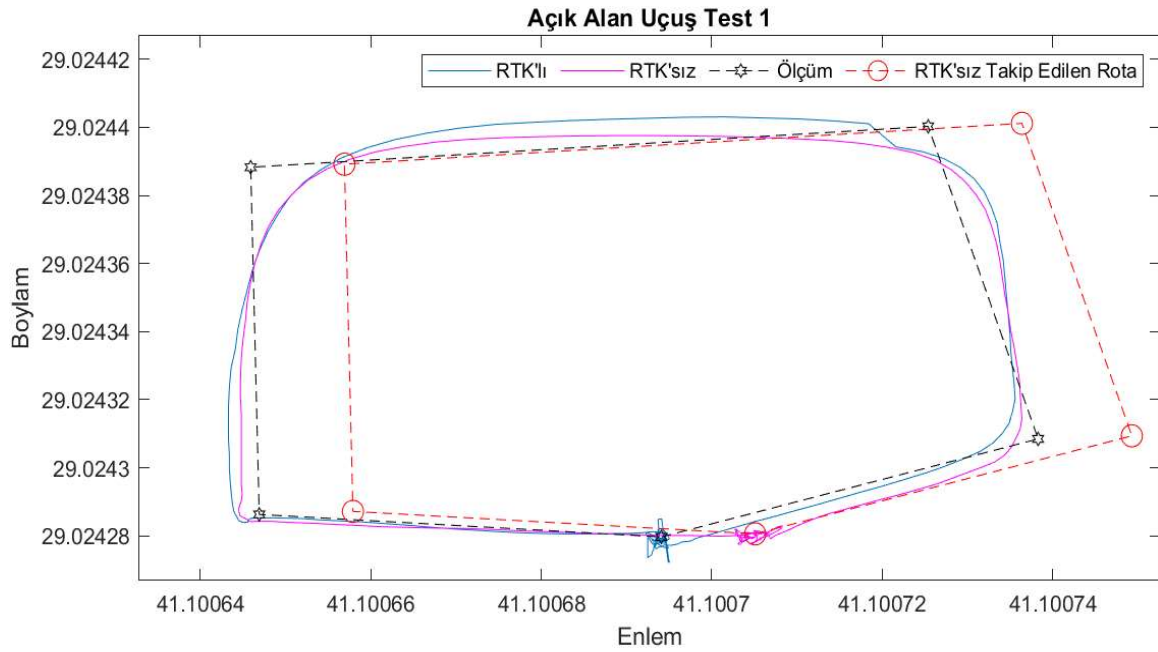


Şekil 24: Ağaçlı 3. Test sonuçları.

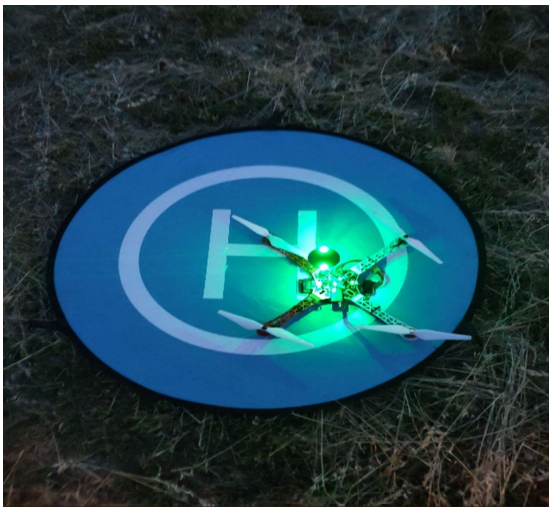
Yukarıda verilen grafiklere bakılarak söylenebilir ki, ağaçlı ortamda sürdürülen testlerde, RTK'sız testlerin tamamında sabit hata oranı ile bir kayma bulunmaktadır. Tekrar eden bu hata, RTK'nın kullanıldığı testlerde gerekli düzeltmeler ile minimize edilmiştir. RTK'lı testlerde bulunan hata oranları, haritadan kontrol edildiğinde metre altı seviyede bulunurken, RTK'sız testlerde bu hata ortalama 2 metre civarında bulunmaktadır. Tüm bunların sonucunda söylenilebilir ki; RTK sisteminin kullanımı, bu tarz durumlarda, ihtiyaca göre uygun ve başarılı sonuçlar vermektedir.

Son olarak engelsiz uçuşta yapılan testlerin sonuçları da bu kısımda verilmiştir. Bu sonuçların yanında başarı göstergesi olarak, iniş noktaları da aşağıda sıralanmıştır.

İlk olarak "Açık Alan Uçuş Test 1" sonuçları ve iniş noktaları, Şek. 25, Şek. 26 ve Şek. 27'de verilmiştir.



Şekil 25: Açık alan 1. Uçuş test sonucu.

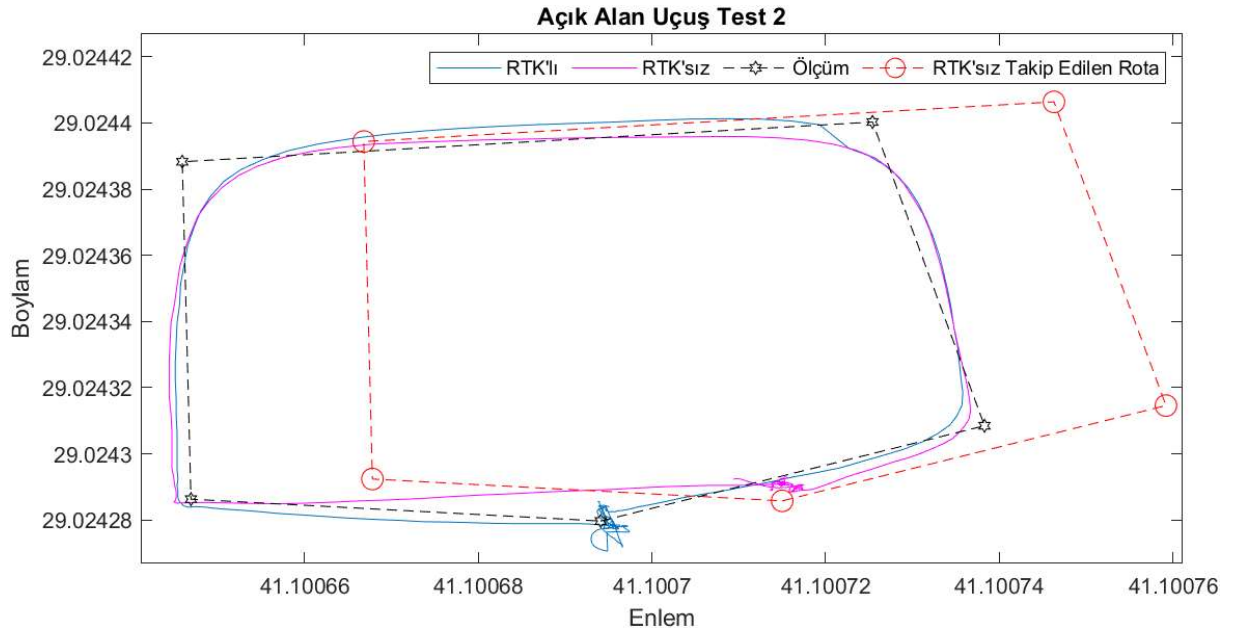


Şekil 26: RTK'lı iniş.



Şekil 27: RTK'sız iniş.

Devamında ikinci olarak "Açık Alan Uçuş Test 2" sonuçları ve iniş noktaları, Şek. 28, Şek. 29 ve Şek. 30'da olmak üzere aşağıda verilmiştir.

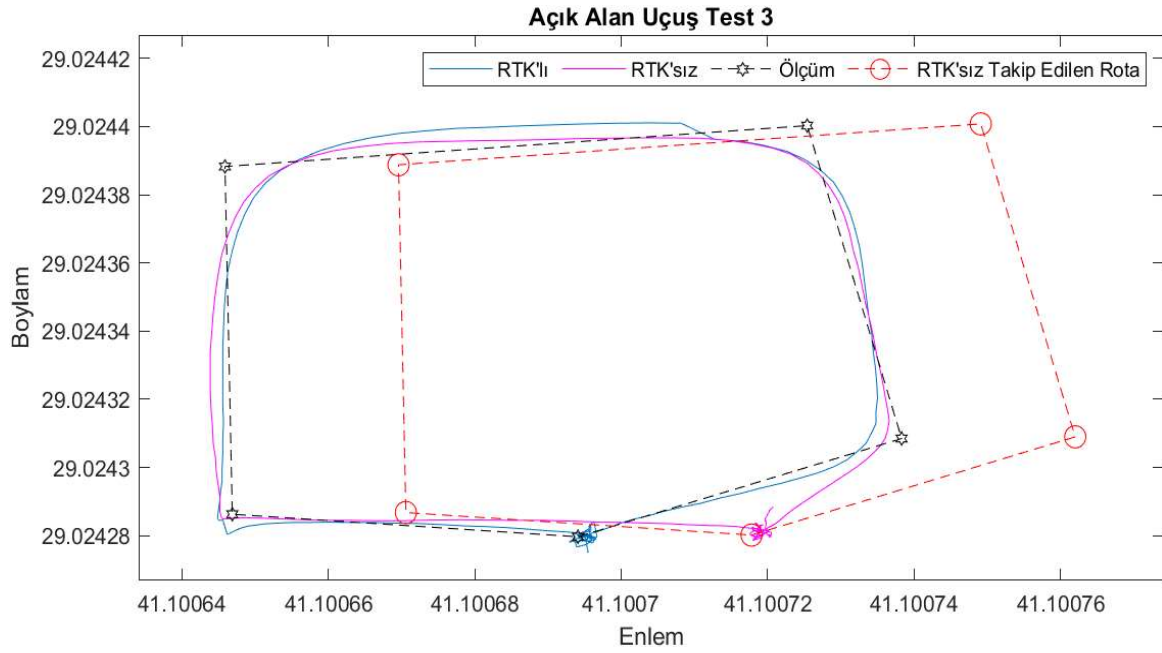


Şekil 29: RTK'lı iniş.



Şekil 30: RTK'sız iniş.

Proje için yapılan uygulamaların son aşamasında, olarak "Açık Alan Uçuş Test 3" sonuçları ve iniş noktaları da Şek 31'de GPS verileri, Şek 32 ve Şek 33'te de iniş noktaları olmak üzere sıralı olarak verilmiştir.



Şekil 31: Açık alan 3. Uçuş test sonucu.



Şekil 32: RTK'lı iniş.



Şekil 33: RTK'sız iniş.

Şek. 25, Şek. 28 ve Şek. 31 üzerinde verilen sonuçlardan siyah kesikli çizgiler, atanan noktalar ve onların oluşturmuş olduğu rotaları ifade etmektedir. Mavi çizgi ile çizilmiş olan rota, RTK sisteminin aktif olduğu uçuş verilerini ifade ederken, mor çizgi ile çizilmiş rota ise; sistemin kullanılmadığı uçuş verilerini göstermektedir. Bunlara ek olarak, kırmızı kesikli çizgiler ile çizilmiş olan rota, RTK sisteminin aktif olmadığı durumda, başlangıç konumundaki kayma baz alınarak çizdirilmiş olup, bu esnada insansız hava aracının yaklaşık olarak takip ettiği rotayı ifade etmektedir. Noktaların toplanma yaptığı kısımlar ise uçuşun başlangıç ve bitiş konumlarını göstermektedir. Grafiklerden de anlaşıldığı üzere; sistemin kullanıldığı uçuşlarda, insansız hava aracı konumunu oldukça hassas bir şekilde algılayabilmekte ve buna göre bir iniş başarısı gösterebilmektedir. İniş görsellerinde de açıkça görülen ve sonuçlarla uyumlu olan durum, tüm inişlerde RTK'lı uçuşların iniş dairesinin içerisinde kalmayı başarmış olmasına rağmen, RTK'nın olmadığı uçuşlarda daireyi dahi tutturamamış

olmasıdır. Bu da RTK sisteminin avantajlı olduğunun bir başka göstergesidir. Detaylı inceleme sonucu anlaşılıyor ki; tüm RTK'lı uçuşlarda belirli bir standart yakalanmış olup, hassas bir iniş kabiliyeti yakalanmıştır. Ancak RTK'sız sonuçlara bakıldığında, tüm uçuşlarda 1-1.5 metre kadar sapmalara kadar çıkan hata oranları göze çarpmaktadır. Özellikle bu hata oranlarının 2. ve 3. testlerde maksimize olduğu görülmektedir. Bunun yanında, test sonuçlarında herhangi bir uyumluluk da görülmemektedir. Ancak eklemek gerekirse; 6.25 santimetre hassasiyet ile ölçülen konumun da hassasiyeti göz önüne alındığında, RTK'lı uçuşlarda da çok az da olsa, bu miktardan daha fazla hata görülmüştür.

SONUÇ

Sürdürülen bu çalışmanın kısa bir özeti yapılacak olursa; geleneksel konum belirleme yöntemlerine dair geniş bir araştırma yapıldı ve raporlandı. Bunun yanında, ülkemizde kullanılan, değerli ağ-RTK sistemimiz TUSAGA-Aktif hakkında bir araştırma yapıldı ve konu hakkında elde edilen bilgiler kısaca derlendi. RTK sisteminin limitleri belirlenmek üzere; spesifik bir araştırma içerisine girildi ve sistemin çalışma prensipleri raporlandı. Ardından spesifik bir cihaz olarak Here+RTK kiti kullanılarak geliştirmeler ile kuruluma hazır bir kablosuz RTK baz istasyonuna dönüştürüldü. Uygun görülen test senaryolar belirlendi ve uygulandı. Tüm bu testlerin ve araştırmaların ardından varılan sonuç; RTK sistemi, her koşulda konum belirleme işlemine bir artı sağlamaktadır. İnsansız hava araçlarında bu durum güvenlik ve görev başarısı açısından değerlendirildiğinde, çok büyük bir önem arz etmektedir. Geleceğin otonom dünyası göz önüne alındığında ve daha güvenli uçuşlar hedeflendiğinde, kullanımı son derece gereklidir ve uygundur.

TEŞEKKÜRLER

İTÜ Havacılık ve Uzay Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi ve Aviyonik Araştırma Grup direktörü Dr. Ramazan YENİÇERİ tarafından bu proje desteklenmiştir. Kendilerine teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Araştırma Görevlisi Serkan ŞENEL, Bilgisayar Mühendisi Onur SEVİMLİ, Makina Mühendisi Mehmet Zeki PAŞAOĞLU'na ve Hatice Meltem BURGU'ya desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Başar, K., ve Ceylan, A., 2018. Uydu konum belirleme sistemlerindeki (GNSS) güncel durum ve son gelişmeler. *Geomatik*, 3(1), pp.64-65.
- Corrections, D.B., 2004. Comparing four methods of correcting gps data: Dgps, waas, l-band, and postprocessing.
- Dabove, P., De Agostino, M. ve Manzano, A., 2012. Achievable positioning accuracies in a network of GNSS reference stations. *Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications*, 1, pp.192-195.
- Dawoud, S., 2012. GNSS principles and comparison. *Potsdam University*, pp. 1-2.
- Eker, R., Alkan, E. ve Aydın, A., 2020. A comparative analysis of UAV-RTK and UAV-PPK methods in mapping different surface types. *European Journal of Forest Engineering*, 7(1), pp.13-14.
- Eren, K., Uzel, T., Gulal, E., Yildirim, O. ve Cingoz, A., 2009. Results from a comprehensive Global Navigation Satellite System test in the CORS-TR network: Case study. *Journal of Surveying Engineering*, 135(1), p.10.
- Ergüner, S., 2017. "Jeodezi Gnss Tusaga-Aktif Teknik Kullanım Esasları". URL https://www.tkgm.gov.tr/sites/default/files/2020-10/jeodezi_gnss_ve_tusaga-aktif_calisma_esaslari_2017_0.pdf.
- ESA-GMV, 2011. "SBAS General Introduction," https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_General_Introduction, [Çevrimiçi;erişim 12.01.2022].
- Farrell, J. ve Givargis, T., 2000. Differential GPS reference station algorithm-design and analysis. *IEEE transactions on control systems technology*, 8(3), pp.519-520.
- GPS.GOV, "GPS Space Segment Constellation Arrangement," <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>, nd. [Çevrimiçi;erişim 28.11.2021].
- Hall, G.W., 1996. USCG differential GPS navigation service. *Coast Guard Navigation Center Report*.
- Heo, Y., Yan, T., Lim, S. ve Rizos, C., 2009, December. International standard GNSS real-time data formats and protocols. In *IGNSS Symp*.
- Hex Company, H., "White paper: Global breakthrough in PPP technology: RTK From the Sky," Tech. Rep. Version 01, Hexagon's Autonomy Positioning Division, Hexagon Calgary Campus, 10921 14th St. NE, Calgary, Alberta, Canada T3K 2L5, November 2020. URL https://en.calameo.com/read/0019157962fa1cfbec650?authid=HAS0tJyQGoy5&utm_source=social_pr&utm_medium=social&utm_campaign=tsx-global-tech-pr, [Çevrimiçi;erişim 28.11.2021].
- İnal, C., Bülbül, S. ve Yildirim, Ö., 2014. Ağ RTK Ölçülerinin Tekrarlanabilirliği. *Afyon Kocatepe University Journal of Science & Engineering*, 14(2), p. 2.
- Kaplan, E.D. ve Hegarty, C. eds., 2017. *Understanding GPS/GNSS: Principles and applications*. Artech house.
- Karaali, C. ve Yildirim, Ö., 1996. Global konum belirleme sistemi (GPS). *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2(2), pp.103-104.
- Korkmaz, C.A., 2020. Donanmaların Etkinliğinin Artırılmasında İnsansız Hava Araçlarının Rolü. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(2), pp.50.
- Öcalan, T. ve Soyca, M., 2011. GNSS Verisinin Gerçek Zamanlı İletimi İçin Uluslararası Standartlar ve Gelişmeler. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (104.2), pp.123-133.
- Park, B., Lee, J., Kim, Y., Yun, H. ve Kee, C., 2013. DGPS enhancement to GPS NMEA output data: DGPS by correction projection to position-domain. *The Journal of navigation*, 66(2), pp.250-253.
- Pehlivan, H., Bezcioglu, M. ve YILMAZ, M., 2019. Performance of Network RTK correction techniques (FKP, MAC and VRS) under limited sky view condition. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 4(3), p.108.

- Pırtı, A. ve Kurtulgu, Z., 2021. Sürekli gözlem yapan referans istasyonları kullanılarak yapılaşmış ve ağaçlık bölgelerdeki konum belirlemenin doğruluk analizi. *Geomatik*, 6(1), p.1.
- PX4, “HEX/ProfiCNC Here+ RTK GPS,” https://docs.px4.io/master/en/gps_compass/rtk_gps_hex_hereplus.html, 2020. [Çevrimiçi;erişim 28.11.2021].
- Sickle, J. V., “Real Time Networks | GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals,” <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1843>, nd. [Çevrimiçi;erişim 06.04.2022].
- Sickle, J. V., “RTK and the Federal Communications Commission (FCC) | GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals,” <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1845>, nd. [Çevrimiçi;erişim 06.04.2022].
- Uzel, T., ve Eren, K., 2006. “Ulusal Cors (Sürekli Gözlem Yapan Gps İstasyonu) Sisteminin Kurulması ve Ulusal Datum Dönüşümü Projesi,” Gelişme Raporu, CORS-TR, URL <http://cors-tr.iku.edu.tr/images/CORS-TR%20Gelisime%20Raporu-1.pdf>.
- Walter, T., 2002. Introduction to the Wide Area Augmentation System. *J. of Global Positioning Systems*, 1(2), p.151.
- Wübbena, G. ve Bagge, A., 2002. RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP. *Geo++ White Paper*, (2002.01).
- Wübbena, G., Bagge, A. ve Schmitz, M., 2001, November. Network-based techniques for RTK applications. In *GPS Symposium, GPS JIN* (pp. 6-7).
- Yıldırım, Ö., Bakıcı, S. ve Mekik, Ç., 2011. Tusaga-Aktif (CORSTR) Sisteminin Tapu Ve Kadastro Genel Müdürlüğüne Katkileri. pp. 134-136.