



Yazılım-tanımlı İHA Ağları için Deney Ortamı Tasarımı

Test-bed Design for Software-defined UAV Networks

Gökhan SEÇİNTİ

İstanbul Teknik Üniversitesi
Bilgisayar ve Bilişim Fakültesi
İstanbul, Türkiye
secinti@itu.edu.tr
ORCID: 0000-0003-0640-8368

Öz

İnsansız Hava Araçları (İHA) çeviklikleri ve esnek kişiselleştirilme seçenekleri ile geniş bir yelpazedeki problemlerin çözümlerinde kolay ve yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Fakat, bu çözümleri geliştirirken ve uygularken uygulama ortamının gerektirdiği birden fazla ve farklı telsiz haberleşme yöntemleri, benzer şekilde çeşitlilik gösteren hesaplama birimlerinin birbirleri ile uyum içerisinde işlemesi zorlu bir engel teşkil etmektedir. Bununla birlikte uçuş denetçisinin de İHA'ların görev sahasına uygun bir şekilde biçimlendirilmesi ve geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada İHA'lar için esnek deney ortamı tanıtılmakta ve kurulum ve yürütülme basamakları anlatılmaktadır. Önerilen deney ortamı haberleşme için Wi-Fi, LoRa ve Yazılım-tanımlı Radyo erişim yöntemlerini desteklemekte ve ek olarak bu haberleşme teknolojilerini ağ katmanı seviyesinde, Yazılım-tanımlı Ağ yaklaşımı kullanılarak yatay düzlemde birleştirmekte ve karmaşık yönlendirme algoritmalarının kolayca yürütülmesine olanak sağlamaktadır. Dolayısı ile önerilen deney ortamı Fiziksel, Veri Bağlantı ve Ağ katmanlarının esnek şekilde değiştirilmesine ve bu katmanları kapsayan çözüm veya çözümlerin kolaylıkla geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Çalışmada son olarak bu önerilen deney ortamı kullanarak elde edilen deney detayları ve ilgili sonuçları paylaşılmaktadır.

Anahtar sözcükler: İnsansız Hava Araçları (İHA), Yazılım-tanımlı Radyo, Yazılım-tanımlı Ağlar (YTA)

Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) can be used to solve a wide range of problems due to their high agility and flexible configuration capabilities. However, developing and implementing these solutions become a challenging obstacle

as multiple communication technologies and computing units must be coordinated to work together seamlessly. Additionally, flight control must be provided appropriately for the task at hand. In this study, we introduce our flexible UAV-based test environment and explain the setup steps. Our test environment has Wi-Fi, LoRa, and Software-defined Radio capabilities for communication. Furthermore, these communication technologies can be adjusted as needed at the network layer level using the Software-Defined Networking paradigm. Therefore, our test environment facilitates the flexible coordination of the Physical, Data Link, and Network layers. Finally, we share the test results obtained using this proposed structure in our study.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, Software Defined Radio, Software Defined Networks

1. Giriş

Günümüzde İHA'lar, teknolojiye ilerlemeyle birlikte, birçok farklı sorunun çözümünde temel araç olarak kullanılmaktadır. İHA'lar tarımdan enerji endüstrisine, acil durum müdahalelerinden çevresel izleme çalışmalarına kadar geniş bir ölçekte kritik roller üstlenmektedir. İHA'lar, tarımda bitki sağlığını sürdürebilmek ve toprak verimliliğini arttırmak için kullanılırken, enerji endüstrisinde ise güç hatlarının bakımını yapmak ve rüzgâr türbinlerini izlemek ve denetlemek için kullanılmaktadır [1]. Ayrıca afet hali gibi kritik ve hızlı müdahale gerektiren durumlarda kurtarma çalışmaları için destek sağlayabilir ve zarar tespitlerinde önemli bir rol oynayabilir. Bu alanlara ek olarak, bu araçlar savunma sanayisi başta olmak üzere ülkelerin doğal kaynaklarının ve varlıklarının korunması gibi askeri alanlarda da her geçen gün daha fazla kullanılmaktadır.

İHA'ların maliyet açısından diğer hava araçlarına göre daha erişilebilir olması ve daha kolay kişiselleştirilebilmesi kullanım

alanlarını benzer birim ve çözümlere kıyasla arttırmaktadır. Ek olarak bu hava araçların denetiminin uzaktan sağlanması ve sürdürülebilmesi, İHA'ların kritik ve tehlikeli görevleri üstlenmesini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, bu araçlar ile kullanılacak geniş duyurga çeşitliliği sayesinde bahsedilen kritik görevlerde ve alanlarda etkin şekilde veri toplanabilmekte ve farklı uygulama alanlarında da değerlendirilebilmektedir. Bu sayede afet durumları gibi insan gücünün kısıtlı olduğu ve mevcut altyapının yetersiz olduğu ortamlarda, görevli insanların (arama kurtarma ekipleri, itfaiye ekipleri vb.) ulaşamayacağı ve müdahale edemeyeceği alanlara kolaylıkla ve risksiz şekilde erişim sağlanır.

Yukarıda bir kısmı tanımlanan bu kullanım alanlarında ve ilgili çözümlerde, İHA'lar tekil olarak kullanılabilen ya da takım olarak görev yapabilmektedirler. Takım halinde kullanıldıklarında İHA'ların eş güdümlü şekilde hareket etmelerinin sağlanması ve yer denetçisinin İHA'lar ile sürekli ve güvenilir iletişim kurması görev başarısı açısından büyük önem taşımaktadır. İHA'ların sahada görev veya görevlerinin başarılı şekilde tamamlanmasını sağlamak için İHA'lar arası ve İHA-yer denetçisi arası bir veya birden fazla iletişim ağının kurulması ve eş zamanlı kullanılması gerekmektedir. Bu ağlarda kullanılacak haberleşme sistemleri için uydu bağlantıları, mobil ağlar ve baz istasyonları gibi seçenekler mevcuttur. Bu haberleşme sistemleri ve ağ altyapıları haberleşme altyapılarını güvenilir ve/veya iş birliği içerisinde olduğu ortamlarda gerekli hizmetleri ve işlevleri sağlayabilmektedir. Fakat mevcut iletişim altyapılarının bulunmadığı (askeri ortamlar, arama kurtarma çalışmaları vb.) ya da altyapı hizmetinin kalitesiz ve/veya yetersiz olduğu ve doğrudan insan müdahalesinin mümkün olmadığı durumlarda İHA'ların etkin şekilde yönetimini sağlayabilmek için özgün ağ yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Tasarsız (*ad-hoc*) ağ yaklaşımı İHA kümelerinin, iletişim altyapısının zayıf veya güvenilir olmadığı bölgelerde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Bu ağ yapısı, doğası gereği karmaşık tasarımlara olan ihtiyacı ortadan kaldırmakta ve esnek bir haberleşme ortamı sağlamaktadır. Bu bağlamda tasarsız ağların ilgi çekiciliği, benzer ağ altyapılarının işlevlerini merkezi bir denetçiden bağımsız şekilde yerine getirebilmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu doğrultuda, bu çalışmada İHA'lar arası haberleşme için temel olarak Wi-Fi (IEEE 802.11) protokolü ve bu protokolün tasarsız ağ yaklaşımından (*IBSS – Independent Basic Service Set*) yararlanan bir İHA deney ortamı önerilmektedir. Ek olarak bu çalışma haberleşme altyapısının kısıtlı olduğu ortamlardaki iletişim zorluklarına çözüm getirmek için LoRa ve YTA'dan faydalanan yeni bir yaklaşım sunulmaktadır.

Bu çalışmada önerilen yazılım-tanımlı İHA ağı deney ortamı, ağ üzerindeki veri akışlarını yönetmek için yazılım-tanımlı bir denetçiden faydalanmaktadır. Bu kapsamda OpenFlow [24] iletişim protokolü, İHA'lar ve ilgili denetçi arasında dinamik ve programlanabilir bir ağ oluşturmak için kullanılmaktadır. Dolayısıyla OpenFlow yazılım-tanımlı iletişim kurallarının ağı yönetmesi ile esnek ve programlanabilir bir denetim elde edilmektedir. Böylelikle geleneksel ağ mimarileri ile karşılaştırıldığında yeni yöntemlerin daha hızlı ve kolay bir şekilde geliştirilmesine ve deneylerinin yapılmasına olanak

sağlanmaktadır. Yazılım-tanımlı denetçi, İHA'lar arasındaki tasarsız iletişimi düzenlemede ve hızla değişen ağ koşullarına uyum sağlamada çok önemli bir rol oynamaktadır. OpenFlow iletişim protokolü yalnızca hızlı ve son derece hareketli İHA'ların denetimini desteklemekle kalmamakta, aynı zamanda ağ trafiğinin de doğrudan denetlenmesine ve yönlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yetenek, bilhassa İHA'lar arasında hızlı veri paylaşımının gerekli olduğu durumlarda çok kritik bir önem teşkil etmektedir. Denetim algoritmalarının anlık olarak ortamdaki değişikliklere göre yürütülmesi, İHA'ların zorlu koşullar altındaki durumlarda bile verimli şekilde uçuşmasını ve iletişim kurmasını sağlamaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi önerilen mimari, Wi-Fi kullanan tasarsız ağ yapısını (IEEE 802.11 IBSS) deney ortamına dâhil ederek, sınırlı altyapıya sahip alanlarda haberleşme koşullarını iyileştirmekte ve aynı zamanda pratik ve etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu ağların denetimi ise Yazılım-tanımlı ağlar (YTA) ve OpenFlow iletişim protokolü kullanılarak yapılmaktadır. Böylelikle İHA'ların dinamik ve kolay öngörülemeyen ortamlarda bile başarılı bir şekilde konumlandırılması için esnek, kolay programlanabilen bir denetleme katmanı oluşturulmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, İHA teknolojilerini ve bunların kaynak kısıtlı ortamlardaki uygulamalarını daha hızlı geliştirmeyi ve farklı haberleşme katmanlarını ve hesaplama unsurlarını kapsayan karmaşık deneyleri kolaylaştıran bir ortam sunmaktır. Bu sayede de bu çalışma, ivmesi gün geçtikçe artan İHA araştırma ortamına destek olmayı hedeflemektedir.

Yukarıda verilen gerekçe ve çıkarımlara ek olarak, YTA ile denetlenen WiFi tabanlı tasarsız bir ağ yapısı esnek bir kullanım sağlasa da uçtan uca haberleşme sırasında ihtiyaç duyulan ara birim sayısındaki artış ile uçtan uca haberleşmedeki veri hızında ciddi bir düşüşe ve gecikme miktarında büyük bir artışa neden olmaktadır [25]. Bu kapsamda düşük enerji gereksinimi ile uzun menzilli haberleşmeye olanak tanıyan LoRa teknolojisi önemli bir potansiyel sağlamaktadır. Önerilen deney ortamında LoRa'nın kullanımı yalnızca haberleşme menzilini genişletmeyi değil, aynı zamanda birbirinden fiziksel olarak uzakta yer alan uç birimlerin haberleşmesi sırasında oluşabilecek yüksek gecikmeleri de denetim altında tutmayı amaçlamaktadır. Ancak LoRa teknolojisinin bu kazanımları (düşük enerji ve uzun menzil) sağlanan veri hızından feragat etmesi ile mümkündür. LoRa'nın bu kazanımlarının yanı sıra sağlayabildiği veri aktarım hızı, LoRa teknolojisinin İHA ağındaki tüm uçtan uca bağlantılar için kullanılmasını imkânsız hale getirmektedir. Bu kısıt göz önünde bulundurulduğunda LoRa'nın İHA ağı üzerindeki bilgi trafiği için değil, yalnızca yer denetçisi ve İHA'lar arasında gereken denetim trafiği için kullanılması uygun görülmektedir. LoRa'nın deney ortamına eklenmesi sayesinde, merkezi yer denetçisi ile İHA'lar arasında aktarılan ağ trafiği ve İHA denetim paketleri LoRa ağ bağlantısı üzerinden iletilebilmektedir. LoRa'nın bu kullanımı, denetim trafiğinin hatasız ve güvenilir olmasını ve enerji açısından verimli bir şekilde iletilmesini sağlamaktadır. Bu sayede hem menzilde etkili bir artış sağlanmakta hem de denetim trafiğinde oluşabilecek yüksek gecikmelerin önüne geçilmektedir. Böylelikle İHA'ların uçuş sırasında ağıdaki veri iletimini etkin bir şekilde yönlendirmesi ve sürdürmesi

desteklenir. LoRa'nın, uzun menzilli haberleşme ve/veya yüksek irtifa gerektiren ortamlarda uçtan uca gecikmeleri daha ölçeklenebilir seviyelerde tutma yeteneği, önerilen deney ortamının genel performansını iyileştiren önemli unsurlardan biridir. LoRa ağ bağlantısının, yer denetçisi ve İHA'lar arasındaki denetim trafiğini desteklemesi ile birlikte İHA'lar yazılım-tanımlı anahtarlar (*switch*) olarak kullanılabilir ve yer denetçisi üzerinde yer alan *OpenDayLight* (ODL) YTA denetçisi sayesinde akış tabloları uygulama katmanında yer alan basit betikler kullanılarak güncellenebilmektedir.

Bunların yanı sıra, yazılım-tanımlı radyo (YTR) kümesinde maliyet etkin yaklaşımlarından biri olan LimeSDR kullanılarak İHA anahtarlar üzerinde veri trafiği için ek bir iskele tanımlanmıştır. Bu iskele, TCP/IP ağ mimarisinde ilk üç katmanda çalışarak karmaşık deneylere olanak ve esneklik sağlamaktadır. Anahtar üzerinde yer alan ve kolaylıkla programlanabilen bu iskele sayesinde farklı kipler (*modulation*) ve kodlama teknikleri, İHA üzerinde görev sırasında kullanılabilir ve tüm katmanları kapsayan bir en iyilemeye olanak tanımlanmaktadır. Bir başka deyişle, önerilen mimari ile, özgün uyarlanabilir kipler ve kodlama (*adaptive modulation and coding, AMC*) kullanan yöntemler kolaylıkla İHA ortamı üzerinde geliştirilebilir ve başarımları ölçülebilmektedir. Uyarlanabilir kipler ve kodlama ile birlikte, haberleşme birimlerinin özel ihtiyaçlarına göre haberleşme frekans bant genişliği dinamik olarak denetlenmekte ve ayarlanmaktadır. Bu sayede değişen ağ koşullarına uyum sağlayan gerçek zamanlı denetimlerle İHA ortamının hizmet niceliği iyileştirilmektedir. Sonuç olarak, LoRa, YTA ve YTR gibi teknoloji ve yaklaşımların birlikte kullanımı, dinamik ve güvenilir bir İHA iletişim ağı elde etmek için kapsamlı bir deney ortamı elde etmemizi sağlamaktadır. Gelişmiş kipler tekniklerinin kullanılması ise, önerilen ağına değişen çevresel koşullara dinamik olarak uyarlanabilir olmasını sağlayarak, haberleşme koşullarının öngörülemez olduğu İHA uygulamaları için sağlam bir çözüm sunmaktadır. Bu tümleşik yaklaşım, özellikle geleneksel iletişim altyapılarının yetersiz kaldığı durumlarda İHA teknolojilerinin ilerlemesine katkıda bulunmaktadır. Özet olarak, bu çalışmada sunulan temel katkılar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- Düşük enerji gereksinimi ve uzun menzilli haberleşmeye olanak tanıyan LoRa teknolojisinin İHA ağlarına bütünleştirilmesi ile özellikle yer denetçisi ve İHA'lar arasında sağlam ve enerji açısından verimli denetim trafiği yaklaşımı sunulmuştur. Bu, özellikle uzun menzilli görevlerde ve zorlu ortamlarda İHA'ların verimli iletişimini ve uçuşunu desteklerken, yüksek gecikmeleri azaltarak ağ performansını iyileştirmektedir.
- Makale, bir YTR yaklaşımı olan LimeSDR'nin İHA ağlarında kullanılması ile haberleşme birimlerinin frekans bant genişliği dinamik olarak ayarlanabildiğini; kipler ve kodlama teknikleri değişen ağ koşullarına göre uyarlanabildiğini göstermektedir. Bu önerilen yaklaşım İHA ağ ortamının hizmet kalitesini artırırken, ağına çevresel koşullara daha dinamik bir şekilde uyum

sağlamasını ve haberleşme koşullarının öngörülemez olduğu durumlar için sağlam bir çözüm sunmasını hedefler.

- Makalenin önerdiği yazılım-tanımlı İHA ağı deney ortamı, veri akışlarını yönetmek için OpenFlow iletişim kurallarıyla etkileşimli ve dinamik bir ağ yapısı sunar. Bu sayede İHA'lar için gelişmiş denetleme mekanizması sağlanır; fiziksel, veri bağı ve ağ katmanındaki hızlı değişiklikler YTA altyapısında gerçekleştirilir.
- Önerilen deney ortamı, İHA teknolojilerinin ve kaynak kısıtlı ortamlardaki uygulamalarının daha hızlı geliştirilmesini ve deneylerinin yürütülmesini kolaylaştıran önemli bir akademik katkıdır. Ayrıca, İHA araştırma ortamına önemli bir destek sağlayarak, TA yapısına bütünleştirmesi zor olan LoRa ve YTR tekniklerinin kurulumunu ve deney ortamının nasıl hazırlandığını adım adım paylaşır.

Makalenin geri kalan bölümlerine ait düzen şu şekildedir: Bir sonraki bölümde, literatürde var olan ilgili çalışmalar anlatılmıştır ve neden önerilen deney ortamına ihtiyaç olduğu gerekçelendirilmiştir. Üçüncü bölümde ise önerilen deney ortamının nasıl çalıştığı ve hangi telsiz iletişim ve İHA denetim teknolojilerinin önerilen test ortamına eklendiği detaylı şekilde açıklanmıştır. Dördüncü bölümde deney ortamımızdan elde ettiğimiz sonuçlar gösterilip tartışılmıştır. Son bölümde ise önerilen yaklaşım ile ilgili önemli detaylar vurgulanıp makalenin çıkarımları sonuçlandırılmıştır.

2. Kaynak Araştırması

Kaynaklara baktığımızda İHA destekli başka ortamları da bulunmaktadır. Bunların çoğu özelleştirilmiş bir sorunun çözümüne odaklanmıştır. Örneğin [2], YTR kullanarak bir yazılım-tanımlı ağ destekli İHA ortamı önermiştir. Bu çalışma ağ işletmeni tarafından verilen denetimlerin en uygun şekilde yürütülmesi için onları dağıtık bir en iyileştirme sorununa çevirip, İHA'ların eş güdümlü bir şekilde çalışmasını sağlayarak yaklaşım sunmuşlardır. Bir diğer deyişle, SwarmControl ismini verdikleri bir çözümle İHA ağlarının denetimini basitleştirmeyi ve en iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Yazarlar, SwarmControl'un benzer çözümlere göre daha etkili ve esnek olduğunu, ayrıca YTA tabanlı ön ürünün deneylerde de öne çıktığını belirterek, önerdikleri çözümün ağ denetimini basitleştirip insan müdahalesini en aza indirdiklerini vurgulamışlardır.

Önerilen bir başka çalışmada ise [3], yazarlar, yüksek hareketli özelliklere sahip uçan tasarsız ağlarda yönlendirme ve erişim iletişim kurallarını kullanarak ağ kapasitesini arttıran bir çözüm önermişlerdir. Bu amaçla, Wi-Fi, YTR ve Doğrudan Sıralı Yayılı Spektrum (DSYS) teknolojileri bir arada kullanılarak esnek bir yönlendirme ve kanal seçim yöntemi geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, önerdikleri yöntemin, yalnızca IEEE 802.11 IBSS bağlantılarını kullanan bir temel duruma kıyasla %51,22 daha fazla net veri hızı ve %52,44 daha az gecikme sağladığını göstermişlerdir. Bu çalışmada ise [4] LoRa teknolojisinin Nesnelerin İnterneti erişim ağları için uygun olduğu kadar tasarsız ağlarda da etkili olduğu vurgulanmıştır.

Çizelge-1: Kaynaklardaki sistemler ile karşılaştırma

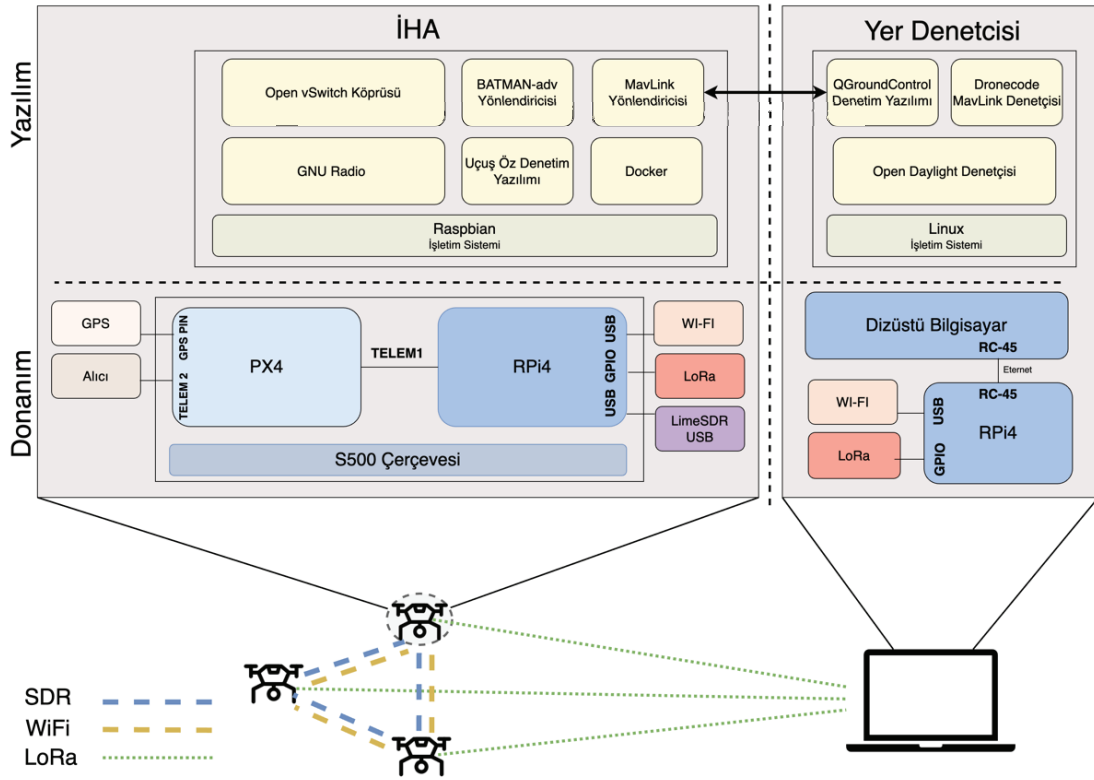
<i>Çalışma</i>	<i>Wi-Fi</i>	<i>LoRa</i>	<i>YTR</i>	<i>CPU</i>	<i>İHA</i>	<i>YTA</i>	<i>Gerçek Deney Ortamı</i>
[2]	✓		✓	✓	✓	✓	✓
[3]	✓		✓		✓		✓
[5]	✓	✓		✓	✓		✓
[6]		✓		✓	✓		
[8]	✓		✓		✓		✓
[12]			✓	✓	✓	✓	
[16]	✓			✓			✓
[19]	✓		✓	✓	✓		✓
[20]	✓		✓	✓	✓		✓
[21]	✓			✓			✓
[25]	✓			✓	✓	✓	✓
[26]	✓			✓	✓	✓	
Bu çalışma	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tarım, ormancılık ve benzeri çevresel uygulamalar için yapılmış [5] bu çalışmada ise hücreli ağ kapsama alanı dışındaki kırsal ortamlarda İHA tabanlı düşük güçlü geniş alan ağı deneylerini desteklemek için geliştirilmiş bir deney ortamı sunulmuştur. Çalışmada, iki katmanlı İHA destekli dar bant Nesnelerin İnterneti ve LoRa kullanılarak geliştirilen ağı deney sonuçları paylaşılmış ve verimli sonuçlar verdiği paylaşılmıştır. Yine bir başka çalışmada [6], LoRa ağ geçitleri ile donatılmış İHA'ların, özellikle çeşitli değişkenleri algılayan çok sayıda yer duyargasıyla, tarım alanları gibi geniş alanların izlenmesinde önemli avantajlar sunduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada [7] önerilen mimaride ise yazılım-tanımlı İHA'lar için 'uçmaya hazır' bir sanal ortam oluşturulmuştur. Bu çerçevede farklı İHA ağ denetim sorunları çok etmenli Derin Pekitirmeli Öğrenme (DPÖ) yaklaşımı ile modellenmiş ve performans verileri toplanarak büyük İHA ağları için verimli bir şekilde ölçeklendirilmiştir. Başka bir çalışmada [8], İHA ve YTR kullanılarak dağıtık mimaride havadan-yere hüzmeleme sistemi geliştirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde İHA sürüsü ile YTR arasında eş zamanlama sağlanmış ve yönlendirmedeki verimliliği arttırmak amacıyla da havadan-yere hüzmeleme sistemine ağırlıklar atanmıştır.

Daha birçok araştırmacı, İHA'ların iletişim yeteneklerini artırmak [9], uzun uçuş sürelerine ulaşmak [10,11] ve görev tamamlamada daha iyi çıktılar elde etmek [12] için İHA'lar üzerinde çalışmış ve çalışmaktadır. Ancak, geliştirilen yöntemlerin ve sistemlerin gerçek hayatta uygulanabilirliğini göstermek ve deneysel doğrulamaları yapmak için öz yönetimli, kapsamlı ve esnek özellikleri olan bir deney ortamının eksik olduğu açıkça görülmektedir.

Öte yandan OpenFlow tabanlı YTA sisteminde ağ cihazları arasındaki veri yolu üzerinde esnek kontrol sağlayarak, ağ trafiğinin daha verimli yönetilmesine imkân tanımıştır [26]. Bu teknoloji, İHA ağlarının yönetiminde önemli bir potansiyel sunar; çünkü İHA ağlarının karşı karşıya olduğu değişken koşullar ve gereksinimler, OpenFlow'un sağladığı esnekliği gerektirir. Ancak, mevcut literatürde, OpenFlow ve benzeri YTA teknolojilerinin İHA ağları üzerindeki uygulamalarına yönelik detaylı deney ortamları ve bu teknolojilerin pratik etkilerini kapsamlı bir şekilde inceleyen çalışmaların eksikliği dikkat çekmektedir. Bir diğer detaylı inceleme yazısında ise ağ fonksiyonlarının sanallaştırılması (NFV) ve YTA'nın entegrasyonunu ele almıştır [27]. Bu entegrasyon, ağ hizmetlerinin maliyet etkin bir şekilde dağıtılmasını ve İHA ağlarının dinamik gereksinimlerine hızlı bir şekilde adapte olunmasını sağlar. Bu çalışma, NFV ve YTA'nın potansiyel avantajlarını belirlemekle birlikte, İHA ağları için spesifik olarak tasarlanmış ve bu teknolojilerin etkilerini detaylı bir şekilde analiz eden deney ortamlarının kurulması konusunda bir boşluk bırakmıştır. İHA tabanlı yeni uygulamaları inceleyen veya deneylerini yürüten birçok çalışma, genellikle benzetim ortamlarından faydalanmaktadır [9,13,14,15]. Ayrıca bir diğer çalışmada [16], açık havada deney ortamının kurulmasının zorluklarına ve her bölge için uçuş izninin alınmasının kolay olmadığına dikkat çekilerek kapalı ortamda uçuş yapabilecek boyutta minik İHA'larla deney ortamı oluşturmuşlardır. Özetle, İHA destekli deney ortamları genellikle belirli özelleştirilmiş sorunlara odaklanmış veya bu konudaki önceki çalışmalarda da [17] vurgulandığı gibi sadece kuramsal çözümlere ve/veya bilgisayar tabanlı benzetim yöntemlerine yönelmişlerdir. Fakat, bu mevcut yaklaşımlar genellikle belirli kullanım durumlarına odaklanmaktadır ve



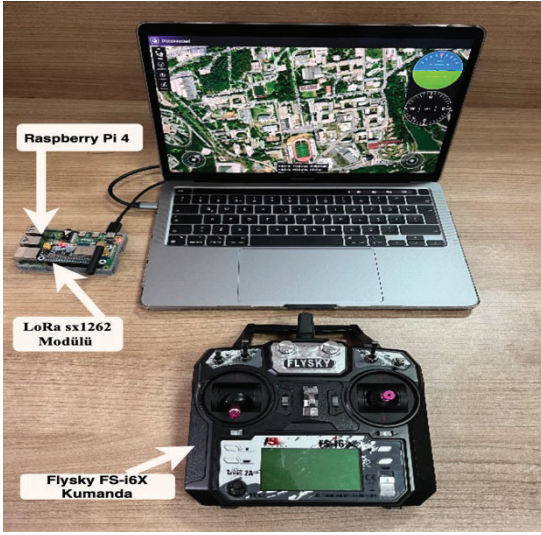
Şekil-1: Önerilen deney ortamına ait yazılım ve donanım mimarisi

genel bir bakış açısı sağlayacak şekilde çözüm önerememektedirler.

Kapsamlı deney ortamının eksikliği, önerilen çalışmaların tam anlamıyla doğrulanamamasına yol açmaktadır [18]. Bununla birlikte çeşitli kaynaklar, İHA tabanlı sistemlere dair detayları yetersiz bir şekilde sunmaktadır. Bazıları sadece kullanılan İHA'nın görsellerini paylaşmakla yetinirken; birçoğu İHA üzerinde önerilen değişikliklerin azami uçuş süresi gibi ilgili iyileştirmelerine olan katkısını detaylı bir şekilde incelememektedirler [19,20]. Suatlı telsiz iletişim sistemleri üzerine odaklanan bu araştırmada [21], geliştirilen iletişim sistemlerinin çıktısını ve güvenilirliğini, gerçek hayattaki çalışmalarda doğru bir şekilde değerlendirebilmek adına deney ortamının hayati bir önemi olduğu vurgulanmıştır. Ek olarak, istikrarlı, tekrarlanabilir ve esnek bir çalışma ortamının oluşturulması bu değerlendirmeleri sağlıklı bir şekilde yapabilmek için gerekli ve şarttır [22, 23]. Önerilen bu çalışmanın önceki çalışmalardan en önemli farkı, YTR, LoRa, WiFi veya YTA gibi birden fazla farklı haberleşme teknolojilerini ve yaklaşımlarını bir araya getirerek gerçek zamanlı kapsamlı bir deney ortamı oluşturmasıdır. Oluşturulan bu deney ortamı, farklı telsiz iletişim yaklaşımları ve etkileşimini durumlar ve ortamlar üzerinde gözlemlemek için kullanılabilir. Bu kapsamlı deney ortamı, ilgili teknolojilerin bütünleştirilmesi ile oluşturulduğundan, çeşitli telsiz iletişim unsurlarının karmaşıklığını ve birbiriyle olan etkileşimlerini gerçekçi bir şekilde benzetimini yapma kapasitesine sahip olacaktır. Son olarak Çizelge-1'de literatürdeki diğer sistemler ile kendi önerdiğimiz sistemin özelliklerini karşılaştırıyoruz.

3. Önerilen Yazılım-tanımlı İHA Ağı Deney Ortamı

Deney ortamı, İHA'lar arasındaki etkileşimi ve İHA'lar ile yer denetçisi arasındaki iletişimi destekleyecek şekilde gelişmiş bir iletişim altyapısı sunar. Bu altyapının temelini oluşturan üç ana iletişim kuralı, YTR, LoRa, ve Wi-Fi, birlikte bir düzen içinde haberleşme ağı sağlar. YTR yaklaşımı İHA'lar arasındaki iletişimi esnek ve uyarlanabilir hale getirirken, LoRa teknolojisi düşük güç tüketimi ve uzun menzil özellikleriyle uzaktaki İHA'larla bile güvenilir bir iletişim kurulmasını mümkün kılar. Wi-Fi ise yüksek hızlı veri transferi ve düşük gecikme süreleriyle İHA'lar arasında hızlı ve güvenilir eş güdümü sağlar. Bu üç temel iletişim protokolü, İHA'lar arasındaki eş güdümü artırırken, yer denetçisi ile sağlanan bütünleştirme sayesinde etkileşimi en iyi duruma getirir ve sistemin verimini güçlendirir. İHA'nın temelinde S500 gövde çerçevesi, Pixhawk 4 uçuş denetim birimi, Raspberry Pi 4 mini bilgisayar, GPS birimi, FlySky FS-X6B uzaktan kumanda, LoRa SX1262 ve LimeSDR USB birimi bulunmaktadır. Şekil-1'de verilen genel iletişim mimarisinde; iki ana düzlemde, İHA düzlemi ve yer düzlemi, iletişim sağlanmaktadır. Bu donanım ve iletişim mimarisi, İHA'nın dengeli uçuş ve görev yürütme kabiliyetini güçlendirmektedir. Deney ortamında Şekil-3' de görüldüğü üzere; güç kaynağı, bir 3S lityum-polimer (LiPo) pil ile sağlanır. RPi4, doğrudan PX4 uçuş denetim biriminin Telem1 bağlantı noktasına bağlanır ve 57600 baud hızında veri iletimi sağlar. İletişim, RPi4 ve PX4 uçuş denetim birimi arasında MAVLink iletişim kuralı kullanılarak gerçekleşir.



Şekil-2: Yer denetçisinde kullanılan donanım

Mavlink İHA haberleşmeleri için yaygın olarak kullanılan bir iletişim kuralıdır.

LoRa birimi olarak Waveshare sx1262 seçilmiştir, 915 Mhz sıklığında çalışır ve bu RPi4 ile uyumludur. RPi4'e bütünleşmesi doğrudan RPi çıkış yerleri üzerinden sağlanır ve LoRa iletişimi için gerekli çalışma ayarları yapılandırılmıştır.

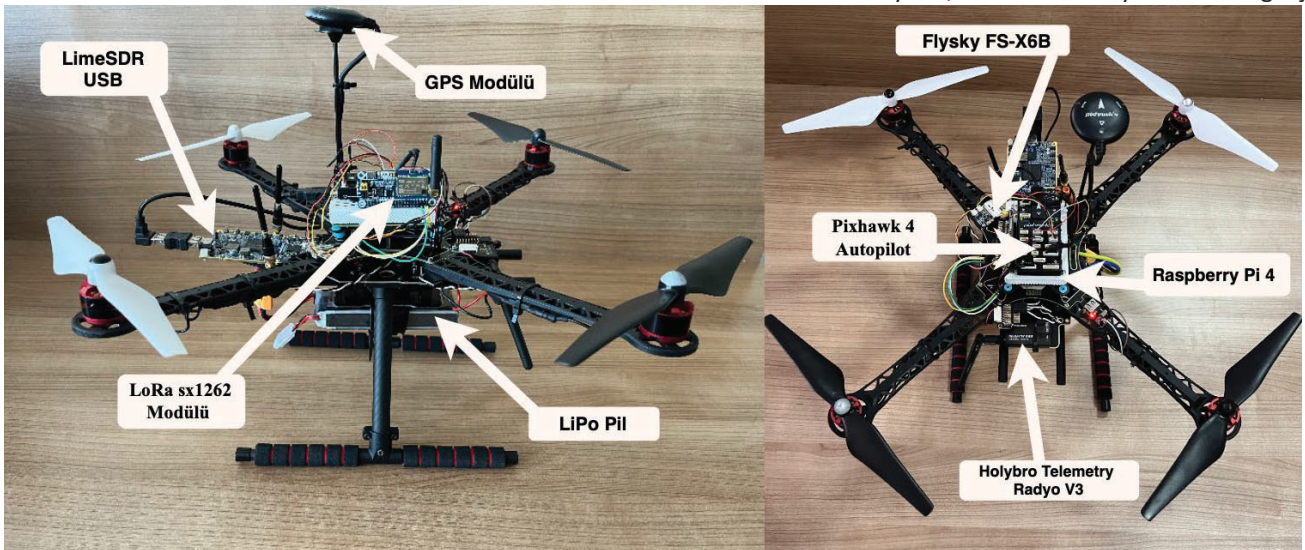
GPS birimi px4 uçuş denetim biriminin GPS bağlantı noktasına bağlanırken, FlySky alıcısı Telem2 bağlantı noktasıyla bütünleştirilir. Deney ortamının önemli bileşenlerinden biri de YTR'dir ve çeşitli radyo işaretlerini yakalayıp iletişim yeteneklerini daha da güçlendirir. Deney ortamımızda YTR özelliklerini YTA'ya uygulamak ve haberleşmeyi sağlamak için LimeSDR USB birimi, USB iskelesi üzerinden RPi4'e bağlanır. Yer denetçisi Şekil-2'de verilmiştir. QGroundControl (QGC), İHA'nın durumunu izlemek ve gerekli ayarlamaları yapmak için yer kontrol seviyesinde kullanıcı için bir arayüz sağlar. RPi4 ve Px4 uçuş denetçi birimi arasındaki MAVLink iletişimi, İHA'nın anlık uzaktan ölçüm verilerinin yer istasyonuna iletimini sağlarken aynı zamanda kullanıcı tarafından

gönderilen komutların da İHA'ya iletilmesini sağlar. Mavlink mesajlarının uzun mesafeleri desteklemesi ve düşük güç tüketimi sunması dolayısı ile LoRa üzerinden iletilir. İHA kumanda ile yönlendirilebileceği gibi QGC'e Wi-Fi bağlantısı ile de bağlanıp yönlendirilebilir. Tipik olarak uzaktan ölçüm yapan bir radyo birimi, iğine bağlantılarını kullanarak uçuş denetim biriminin Telem1 bağlantı noktasına bağlanır ve iletişim için QGC ile bir radyo bağlantısı kurar. Ancak deney ortamımızda RPi ile iletişimi kolaylaştırmak için uçuş denetim birimi üzerindeki Telem1 bağlantı noktasını genel bir MAVLink iletişim bağlantı noktası olarak kullanıyoruz. QGC ile bağlantıyı ise LoRa bağlantısı üzerinden gerçekleştiriyoruz. LoRa birimleri içinde bulunan LoRa SX1262 kütüphanesi kullanılarak kararlı bir bağlantı sağlanır ve İHA ile yer denetçisi arasında iletişim kurulur. Bu deney ortamı, uzun menzilli ve güçlü bir iletişim yeteneği sunar, böylece İHA işlemleri ve değişkenleri uzaktan hassas bir şekilde izlenebilir ve yönetilebilir hale gelir.

3.1 Önerilen Deney Ortamının Pratikte Kullanımı

Bu çalışmanın gerçek dünya senaryolarında nasıl uygulanabileceği ve pratik etkinliği, gelişmiş iletişim teknolojileri ve yazılım-tanımlı ağ (YTA) yaklaşımlarını entegre eden önerdiğimiz yenilikçi İHA ağı deney ortamımız ile çeşitli kullanım senaryoları ile sağlanabilir.

Wi-Fi ve LoRa'nın yanı sıra YTR kullanarak sağladığımız esnek haberleşme altyapısı, geniş bir uygulama yelpazesinde adaptasyon ve optimizasyon imkânı sunmaktadır. Örneğin, acil durum müdahaleleri sırasında, afet bölgesinden gerçek zamanlı veri toplama ve hızlı bir şekilde yer denetçisiyle iletişim kurma kapasitesi, arama-kurtarma ekiplerinin etkinliğini artırarak insan hayatını kurtarmada hayati bir rol oynayabilir. İHA'larımızın uzun mesafeli ve enerji verimli haberleşme yetenekleri, zorlu koşullar altında bile güvenilir veri iletimi sağlayarak hızlı ve etkili bir müdahale imkânı sunmaktadır. Benzer şekilde, çevresel izleme projelerinde, İHA'larımız aracılığıyla elde edilen hassas tarımsal verilerin analizi, tarım sektöründeki verimliliği ve sürdürülebilirliği artırabilir. Bu senaryolar, önerilen deney ortamının gerçek



Şekil-3: Deney ortamında kullanılan bir İHA'nın yandan ve üstten görünümü

zamanlı uygulamalarda nasıl uyarlanabileceğini ve karmaşık veri akışlarını yönetirken esneklik ve yüksek performans sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu çalışma, gerçek zamanlı trafik yönetimi ve akıllı şehir uygulamaları gibi daha geniş bir yelpazede uygulama alanları için İHA teknolojilerinin potansiyelini açığa çıkarmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, İHA tabanlı sistemlerin geliştirilmesi ve test edilmesi için esnek, kapsamlı ve gerçek dünya koşullarına uygun bir deney ortamı sunarak, İHA teknolojilerinin ilerlemesine ve çeşitli sektörlerdeki uygulamalarına önemli katkılarda bulunmaktadır.

4. Performans Değerlendirmesi ve Deneysel Sonuçları

Önerdiğimiz deney ortamının başarımını sınamak için iki İHA'dan oluşan iki farklı deney ortamı hazırlanmıştır. Bunlardan ilkinde, İHA'ları birbirine 10 metre uzaklıkta uçurup, aralarındaki mesafeyi arttırarak bağlantı kalitesindeki değişim, veri iletim hızı ve gecikme süresi incelenmiştir. Ayrıca YTA yardımı ile birbirinden bağımsız bağlantıları farklı haberleşme kuralları kullanarak gönderdik. Kampüs kuralları gereği geniş ölçekli uçuşlar planlayamadığımız için, aygıtların anten güçlerini azaltarak daha yüksek uzaklık gereken tetiklemeleri gerçekleştirebildik. Deneylerde üç farklı yöntemi karşılaştırmaktayız: sadece Wi-Fi, sadece YTR ve birleşik veri gönderimi. YTR ile olan yöntemde DSYS kullandık. Birleşik metotta ise göndereceğimiz verinin yarısını YTR yarısını ise Wi-Fi ile gönderiyoruz.

Bu yöntemde artan veriyi ikiye ayırma ve sonradan birleştirmeden gelen artmış karmaşıklık karşılığında daha yüksek veri hızı hedefledik. İkinci deney ortamımızda ise bir tane İHA'yı uçururken etraftaki Wi-Fi erişim noktalarından gelen işaretlere göre, o erişim noktaları ile İHA arasındaki bağlantı kalitesinin değişimini İHA'nın konumuna göre inceledik. Bu erişim noktalarından gelen işaretlerin kalitesini ise İHA üzerindeki YTR ile ölçülmüştür.

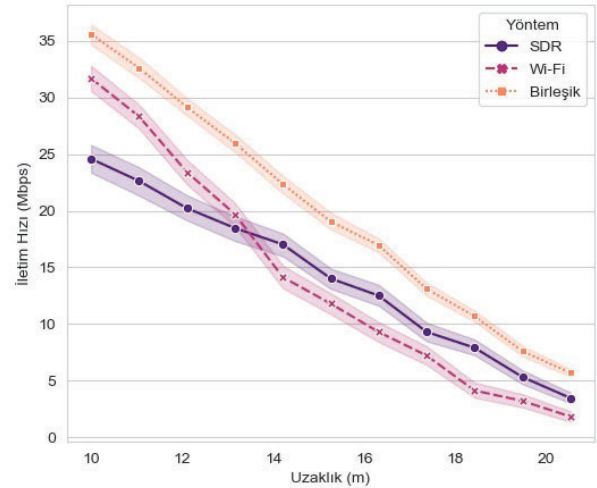
4.1 Bağlantı Kalitesi Ölçümleri

İki İHA'nın birbirlerine göre uzaklıklarını arttırırken veri hızının değişimini Şekil-4'te göstermekteyiz. Burada, Wi-Fi uzaklık azken YTR'dan daha hızlı veri iletimi sağlasa da uzaklık arttıkça YTR'dan daha kötü bir çıktı sergilemiştir. Bunun nedeni DSYS'nin daha yüksek bir bant genişliğine sahip olması ve bu nedenle daha dayanıklı bir iletim sağlamasıdır.

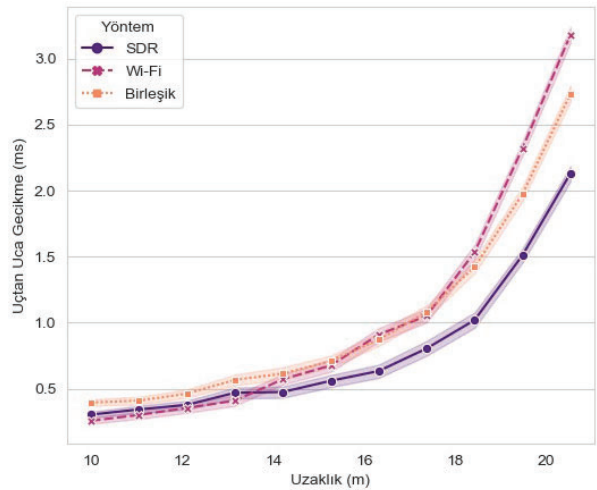
Ayrıca Wi-Fi ile YTR'yi birleştiren yöntemimiz daha yüksek veri iletim hızı sağlamıştır. Bunun asıl nedeni DSYS ile Wi-Fi haberleşme yöntemlerinin farklı kanalları kullanmasıdır.

Bundan sonraki ölçümümüzde ise uçtan uca bağlantı gecikmesini Şekil-5'te incelemekteyiz.

Burada ilk göze çarpan değişiklik düşük uzaklıkta birleşik yöntemin diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek bir gecikmeye neden olmasıdır. Bunun asıl nedeni gönderilen paketleri ikiye bölüp tekrar birleştirmek için harcanan fazladan zamandır. Bu gecikme uzaklık arttıkça ve bağlantı kalitesi düştükçe, asıl iletim gelişmesine kıyasla daha az bir etkiye neden olmaktadır ve Wi-Fi yönteminden daha iyi bir sonuç vermektedir. Son olarak YTA kullanarak farklı veri akışlarını farklı haberleşme kuralları ile göndererek iki akış için de daha az bir gecikme



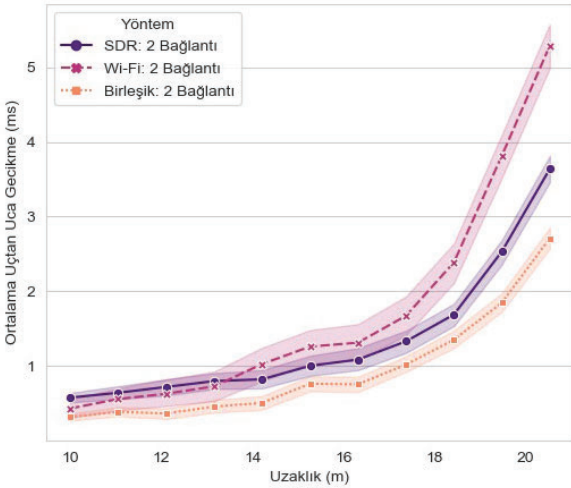
Şekil-4: Artan uzaklığa karşılık iletim hızının değişimi.



Şekil-5: Artan uzaklığa karşılık uçtan uca gecikme değişimi.

sağladı. Şekil-6'da bu deneyin sonuçları mevcuttur. Burada, farklı veri akışları için aynı haberleşme kaynağını kullanan yöntemler ortalama olarak daha fazla uçtan uca gecikmeye neden olmuşlardır.

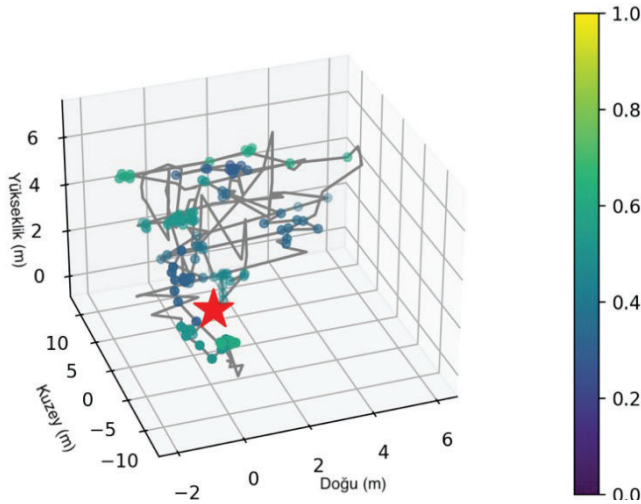
Öte yandan YTA denetimi sayesinde yerdeki görev denetçisi farklı akışlar için farklı iletişim kanalı numarası tanımlayıp bir akışı Wi-Fi ile, öteki akışı ise YTR ile göndermiştir. Bu sayede iki akış koşut olarak iletilmiş ve sonuç olarak ortalama gecikme de azalmıştır. Deney sonuçlarımız, İHA'ların birbirine olan mesafelerinin arttırılması durumunda bile, yazılım-tanımlı radyo ve Wi-Fi teknolojilerinin birleşik kullanımı ile iletişim istikrarının ve hızının korunabildiğini göstermektedir. Özellikle, düşük enerji tüketimi ve yüksek menzil özellikleriyle dikkat çeken LoRa teknolojisinin entegrasyonu, İHA'ların daha geniş alanlarda etkili bir şekilde görev yapabilmelerine olanak tanımıştır. Ayrıca, YTR ve Wi-Fi teknolojilerinin birleşik kullanımı, veri iletim hızını optimize ederken, uçtan uca gecikme sürelerinin minimumda tutulmasını sağlamıştır.



Şekil-6: Artan uzaklığa karşılık farklı veri akışlarının ortalama uçtan uca gecikme değişimi.

4.2 Erişim Noktası ile Bağlantının Konuma göre Değişimi

Son olarak, yapılan uçuşlarda GPS yardımı ile konumun değişimine göre bir Wi-Fi erişim noktasına olan bağlantının kalitesi YTR kullanılarak Şekil-7'de gösterilmiştir. Bu şekilde, yıldız erişim noktasının konumunu gösterirken İHA'nın hareket çizgisi üzerindeki noktalar ise işaret gücünün ölçümlerini göstermektedir. Şekildeki konumlar metre cinsindedir ve erişim noktası tarafımızdan yerleştirildiği için konumu bizim tarafımızdan belirlenmiştir.



Şekil-7: Artan uzaklığa karşılık farklı veri akışlarının ortalama uçtan uca gecikme değişimi

YTA denetimi ile gerçekleştirilen dinamik iletişim yöntemi sayesinde, farklı veri akışları için uygun haberleşme kurallarının atanması, kaynak kullanımının verimliliğini artırarak, sistem performansını iyileştirmiştir. İHA'ların farklı Wi-Fi erişim noktalarına olan bağlantı kalitesinin konuma göre değişimi analizi, gerçek zamanlı ortamlarda İHA'ların adaptasyon yeteneğini ve iletişim güvenilirliğini kanıtlar

niteliktedir. Bu kapsamlı değerlendirme, önerilen deney ortamının, karmaşık gerçek dünya senaryolarında karşılaşılabilecek iletişim zorluklarını üstesinden gelebilecek esnekliğe ve güvenilirliğe sahip olduğunu göstermektedir.

4.3 Önerilen Yaklaşımın Kullanılabilirlik Gözlemleri

Bu bölümde, önerilen İHA tabanlı esnek deney ortamının kullanılabilirliğini ve kullanıcı deneyimini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen kullanılabilirlik testlerinin sonuçları sunulmaktadır. Çalışma kapsamında, çeşitli kullanıcı gruplarına yönelik olarak tasarlanan senaryolar üzerinden ölçüm tamamlama süreleri, Sistem Kullanılabilirlik Ölçeği (İngilizce: System Usability Scale (SUS)) puanları ve kullanıcı memnuniyet derecelerini içeren bir dizi test gerçekleştirilmiştir. Çizelge-2, test sürecinde elde edilen sonuçları özetlemektedir.

Çizelge-2: Kullanılabilirlik Sonuçları

Kullanıcı Grubu	Ortalama Ölçüm Tamamlama Süresi	SUS Puanı (0-100)	Memnuniyet Derecesi (1-5)
Yeni Başlayanlar (5 kişi)	41dk	81	4
Orta Seviye Kullanıcılar (5 kişi)	28dk	85	5
İleri Düzey Kullanıcılar (5 kişi)	15dk	88	5

Kullanıcı grupları, araştırma laboratuvarında çalışan kişiler arasından farklı tecrübe seviyelerine göre gruplama yapılarak oluşturulmuştur. Ortalama ölçüm tamamlama süresi, önerilen yaklaşım kullanıldığında 15 dakikalık bir uçuş görevi sonunda açığa çıkan ölçüm verilerinin başarıyla toplanması için harcanan süreyi göstermektedir. SUS puanı ise kullanıcıların bir ürün, sistem veya servisin kullanılabilirliğini değerlendirmek için verdiği yanıtlara dayanan, 1'den 5'e kadar bir Likert ölçeği üzerinden puanlama yapan bir anket yöntemidir [26]. SUS anketi, toplam 10 ifadeden oluşmaktadır ve bu ifadeler, sistemin çeşitli kullanılabilirlik yönlerini yansıtır. Bu ifadelerin yarısı olumlu, diğer yarısı ise olumsuz şekilde formüle edilmiştir. Ankette 1 'Kesinlikle Katılmıyorum' ve 5 'Kesinlikle Katılıyorum' anlamına gelmektedir. Puanlama elde edilirken olumlu ifadeler verilen yanıtlardan 1 çıkarılırken, olumsuz ifadelerin puanları 5'ten çıkarılıp ters çevrilir. Bu işlemlerden sonra, elde edilen değerlerin toplamı 2,5 ile çarpılarak 0 ile 100 arasında bir SUS puanı elde edilir [29]. Memnuniyet derecesi de 1 'Kesinlikle Katılmıyorum' ve 5 'Kesinlikle Katılıyorum' ölçeği üzerinden değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen kullanılabilirlik testleri ve elde edilen kullanıcı geri bildirimleri, önerilen İHA tabanlı esnek deney ortamının, pratik kullanımlarda yüksek performans ve kullanıcı memnuniyeti sağladığını göstermektedir. Bu sonuçlar, sistemimizin ileriye dönük geliştirmeler için sağlam bir temel oluşturduğunu ve kullanıcı ihtiyaçlarına yönelik etkili çözümler sunabilecek potansiyele sahip olduğunu vurgulamaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışmada İHA tabanlı esnek deney ortamımızı tanıttık. Deney ortamımız, Wi-Fi ve LoRa haberleşme teknolojilerinin yanı sıra YTR de kullanarak esnek haberleşme altyapısına sahiptir. Ayrıca, YTA desteği ile birbirlerinde farklı haberleşme teknolojileri aynı ağ içinde dinamik olarak kullanılabilir. Dahası, farklı akışlara farklı haberleşme teknolojileri atanarak koştur veri akışına imkân verilir ve daha yüksek bir ağ kalitesi sağlanmıştır. Ayrıca YTR yardımı ile etrafta var olan haberleşme ağlarının ölçümlerini incelemek mümkündür.

Bu çalışmada tanıtılan yazılım-tanımlı İHA ağı deney ortamı, mevcut alternatif çözümlerle karşılaştırıldığında, YTR ve LoRa teknolojilerinin entegrasyonunun, İHA ağlarında önemli performans iyileştirmeleri sağladığını ortaya koymuştur. Özellikle iletişim istikrarlılığı, hızı, güvenilirliği ve kaynak kullanımı gibi kritik metrikler üzerinden önerilen çözüm vurgulanmıştır. Ayrıca, önerilen YTA yaklaşımının dinamik iletişim yönetimi kapasitesi, esnek ve ölçeklenebilir bir sistem tasarımı sunarak, mevcut statik iletişim ağlarına kıyasla önemli bir avantaj sağlamıştır. Bununla birlikte, çalışmamız, yazılım-tanımlı teknolojilerin karmaşıklığı ve yüksek başlangıç maliyeti gibi faktörler nedeniyle mevcut çözümlere kıyasla dezavantaj da göstermektedir. Bu da geniş çaplı uygulamalarda dikkate alınması gereken önemli hususlardır.

Sonuç olarak, önerilen çözüm, İHA ağlarının yönetiminde esneklik, genişletilebilirlik ve dinamik adaptasyon sağlama konusunda önemli bir adım olarak değerlendirilmekte; ancak güvenlik ve gizlilik gibi kritik konularda daha derinlemesine çalışmalar gerekmektedir. Gelecek çalışmalar, bu alandaki eksiklikleri gidermeye yönelik olacak ve İHA tabanlı iletişim ortamlarının güvenlik ve gizlilik performansını artıracak yöntemler üzerine odaklanacaktır.

Kaynakça

- [1] Fan, B., Li, Y., Zhang, R., & Fu, Q., *Review on the technological development and application of UAV systems*. Chinese Journal of Electronics, 29(2), 2020, 199-207.
- [2] Bertizzolo, L., D'oro, S., Ferranti, L., Bonati, L., Demirors, E., Guan, Z., Melodia, T., & Pudlewski, S., *Swarmcontrol: An automated distributed control framework for self-optimizing drone networks*, 2020, <https://arxiv.org/abs/2005.09781>
- [3] Çoğay, S., Sarı, T. T. & Seçinti, G. *SoNaR: Software-defined Network and Radio Framework for FANETs*, IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2021, pp. 268-273.
- [4] Paredes, W.D., Kaushal, H., Vakili, I., Prodanoff, Z. *LoRa Technology in Flying Ad Hoc Networks: A Survey of Challenges and Open Issues*, Sensors 2023, 23, 2403. <https://doi.org/10.3390/s23052403>
- [5] Sobot, S., et al., *Two-Tier UAV-based Low Power Wide Area Networks: A Testbed and Experimentation Study*, 2023 6th Conference on Cloud and Internet of Things (CIoT), Lisbon, Portugal, 2023, pp. 85-90, doi: 10.1109/CIoT57267.2023.10084912.
- [6] De Rango, F., & Stumpo, D., *Supporting Path Planning in LoRa-based UAVs for dynamic Coverage for IoT devices*, 2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2023, pp. 337-340, doi: 10.1109/CCNC51644.2023.10060525.
- [7] Cheng, H., Bertizzolo, L., D'oro, S., Buczek, J., Melodia, T., & Bentley, E.S., "Learning to Fly: A Distributed Deep Reinforcement Learning Framework for Software-Defined UAV Network Control," in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 2, pp. 1486-1504, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3092690.
- [8] Mohanti, S., et al, "AirBeam: Experimental Demonstration of Distributed Beamforming by a Swarm of UAVs," 2019 IEEE 16th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS), Monterey, CA, USA, 2019, pp. 162-170, doi: 10.1109/MASS.2019.00028.
- [9] Aydın, E. E., Kara, O., Cakir, F., Cansiz, B. S., Secinti, G., & Canberk, B., *Enabling Self-Organizing TDMA Scheduling for Aerial Swarms*. In Proceedings of the Eighth Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications, 2022, July, pp. 13-18.
- [10] Shukla, R.M., Sengupta, S., & Patra, A.N., "Software-defined network based resource allocation in distributed servers for unmanned aerial vehicles," in Proc. IEEE CCWC, 2018.
- [11] Zhao, Z., et al., "Software-defined unmanned aerial vehicles networking for video dissemination services," Ad Hoc Netw., vol. 83, 2019, pp. 68-77, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870518306231>
- [12] Xiong, F., Li, A., Wang, H., & Tang, L., "An SDN-MQTT Based Communication System for Battlefield UAV Swarms," in IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 8, August 2019, pp. 41-47, doi: 10.1109/MCOM.2019.1900291.
- [13] Shurrab, M., Mizouni, R., Singh, S., & Otrok, H., *Reinforcement learning framework for UAV-based target localization applications*. Internet of Things, 23, 100867, 2023.
- [14] Choi, H.-H., Oh, J., Kang, K.-M., & Lee, H., "Idle-Less Slotted ALOHA Protocol for Drone Swarm Identification," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no. 8, Aug. 2023, pp. 11080-11085, doi: 10.1109/TVT.2023.3261104.
- [15] Chang, H., Chen, Y., Zhang, B., & Doermann, D., "Multi-uav mobile edge computing and path planning platform based on reinforcement learning", IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2021.
- [16] Liu, X., Lam, K., Alkouz, B., Shahzaad, B., & Bouguettaya, A., "Constraint-based Formation of Drone Swarms," 2022 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops), Pisa, Italy, 2022, pp. 73-75, doi: 10.1109/PerComWorkshops53856.2022.9767410.
- [17] Song, Q., Zeng, Y., Xu, J. et al., *A survey of prototype and experiment for UAV communications*. Sci. China Inf. Sci. 64, 140301, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11432-020-3030-2>
- [18] Douklias, A., Karagiannidis, L., Misichroni, F., & Amditis, A., Design and implementation of a UAV-based airborne computing platform for computer vision and machine learning applications, Sensors, 22(5), 2049, 2022.
- [19] Shi, Y., Wensowitch, J., Ward, A., Badi, M., & Camp, J., "Building UAV-Based Testbeds for Autonomous Mobility and Beamforming Experimentation," 2018 IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking (SECON Workshops), Hong Kong, China, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/SECONW.2018.8396345.
- [20] Sommer, D., Irigireddy, A.S.C.R., Parkhurst, J., & Nastrucci, E.-R., "SDR- and UAV-Based Wireless Avionics Intra-Communication

- Testbed*," 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC), San Antonio, TX, USA, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/DASC50938.2020.9256639.
- [21] Enhos, K., Unal, D., Turco, J., Demirors, E., & Melodia, T., *Marena: Sdr-based testbed for underwater wireless communication and networking research*. In Proceedings of The 17th ACM Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental evaluation & Characterization, 2023, October, pp. 80-87.
- [22] Baumgärtner, L., Bauer, M., & Bloessl, B., *SUN: A Simulated UAV Network Testbed with Hardware-in-the-Loop SDR Support*. In 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2023, March, pp. 1-6.
- [23] Lahoud, C., Ehsanfar, S., Gabriel, M., Küffner, P., & Mößner, K., *Experimental Testbed Results on LTE/5G-V2I Communication using Software Defined Radio*. In ICC 2022-IEEE International Conference on Communications, 2022, May, pp. 2894-2899.
- [24] McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S. & Turner J.. 2008. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 38, 2, April 2008, 69–74. <https://doi.org/10.1145/1355734.1355746>
- [25] Secinti G., Trotta A., Mohanti S., Di Felice M. & Chowdhury K. R., "FOCUS: Fog Computing in UAS Software-Defined Mesh Networks," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 21, no. 6, pp. 2664-2674, June 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2960305.
- [26] Sharma, V., Song, F., You, I., & Chao, H. C. (2017). Efficient management and fast handovers in software defined wireless networks using UAVs. IEEE Network, 31(6), 78-85.
- [27] Oubbati, O. S., Atiquzzaman, M., Ahanger, T. A., & Ibrahim, A. (2020). Softwarization of UAV networks: A survey of applications and future trends. IEEE Access, 8, 98073-98125.
- [28] Brooke, J. (2013). SUS: a retrospective. Journal of usability studies, 8(2), 29-40.