

**İNSANLI VE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ
MATLAB/SİMULİNK VE X-PLANE KULLANILARAK
BENZETİM ORTAMININ GELİŞTİRİLMESİ**

Tamer SAVAŞ
Yüksek Lisans Tezi

Pilotaj Anabilim Dalı
Eylül-2015

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1410F419**

JURİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Tamer SAVAŞ'ın “**İnsanlı ve İnsansız Hava Araçlarının Matlab/Simulink ve X-Plane Kullanılarak Benzetim Ortamının Geliştirilmesi**” başlıklı Pilotaj Anabilim Dalındaki Yüksek Lisans tezi, 16.09.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Sınav Yönetmenliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) : Yard. Doç. Dr. Tansu FİLİK
Üye (İkinci Danışmanı) : Prof. Dr. Mustafa CAVCAR
Üye : Yard. Doç. Dr. Hakan KORUL
Üye : Yard. Doç. Dr. Mustafa Müjdat ATANAK
Üye : Yard. Doç. Dr. Mehmet KOÇ

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı
kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNSANLI VE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ MATLAB/SİMULİNK VE X-PLANE KULLANILARAK BENZETİM ORTAMININ GELİŞTİRİLMESİ

Tamer SAVAŞ

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Pilotaj Anabilim Dalı**

Danışman: Yard. Doç. Dr. Tansu FİLİK

2015, 54 sayfa

Bu çalışmada sabit kanatlı bir hava aracı için hareketli olmayan bir benzetim ortamı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen benzetim ortamı yazılımsal ve donanımsal bileşenlerden oluşmakta olup Uçuş Test ve Eğitim Simülatörü (UTES) olarak adlandırılmıştır. Geliştirilen UTES sisteminde rafta hazır ticari (RAHAT) yazılım ve donanımların kullanılması yoluna gidilerek maliyetlerin düşürülmesi ve sistem güvenilirliğinin artırılması hedeflenmiştir. Geliştirilen UTES sistemiyle düşük maliyetli uçuş eğitim ortamı (sınıfı) oluşturulabildiği gösterilmiştir ve uzman eğiticiler tarafından yapılan test ve geri bildirimler doğrultusunda iyileştirmeler yapılmıştır. Aynı zamanda geliştirilen UTES sisteminde aviyonik donanım ve yazılım (algoritma) geliştirilmesine ve test edilmesine olanak sağlayacak altyapı oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Uçuş Simülatörleri, X-Plane, Döngüde Donanımsal Benzetim, Döngüde Yazılımsal Benzetim, Matlab/Simulink

ABSTRACT

Master of Science Thesis

SIMULATION ENVIRONMENT DEVELOPMENT OF THE MANNED AND UNMANNED AIR VEHICLES UTILIZING MATLAB/SIMULINK AND X-PLANE

Tamer SAVAŞ

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Department of Flight Training**

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Tansu FİLİK

2015, 54 pages

In this study, it is implemented a non-motion simulation environment for a fixed-wing aircraft. The simulation environment which is consist of software and hardware components are named Flight Test and Training Simulator (UTES). It is aimed to reduce costs and improve safety with the use of commercial of-the-shell (COTS) software and hardware in UTES system. It is shown to create a low-cost flight training environment (classroom) and made improvements in accordance with test and feedback by expert trainers. At the same time a platform which enables development and test of avionic equipment and software (algorithm) is established with developed UTES system.

Keywords: Flight Simulator, X-Plane, Hardware In The Loop Simulation-HIL, Software In The Loop Simulation-SIL, Matlab/Simulink

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
TEŞEKKÜR	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tarihçe	1
1.2. Sanal Ortam	5
1.3. Benzetim	6
1.4. Benzetim Sadakati	7
1.5. Eğitim Transferi	8
1.5.1. Eğitim Transferinin Değerlendirilmesi	9
1.6. Uçuş Eğitim Simülatörleri	10
1.6.1. Tanım.....	11
1.6.2. Uçuş Simülatörlerinin Sınıflandırılması.....	11
1.6.3. Uçuş Eğitim Simülatörlerinin Sadakat Seviyeleri.....	15
1.6.4. Uçuş Eğitim Simülatörlerinin Faydaları.....	16
1.7. Simülatör Hastalığı	17
2. UÇUŞ TEST VE EĞİTİM SİMÜLATÖRÜ (UTES)	19
2.1. Giriş	19
2.2. Uçuş Test ve Eğitim Simülatörünün Yapısı	19
2.3. UTES Sisteminin Yazılım ve Donanım Bileşenleri	21
2.3.1. Uçuş Benzetim Yazılımları	21
2.3.2. X-Plane	23
2.3.3. UDP	25
2.3.4. Donanım Bileşenleri.....	29
3. UTES KULLANILARAK GELİŞTİRME VE TEST ORTAMI OLUŞTURULMASI	30

3.1. Giriş	30
3.2. Döngüde Donanımsal Benzetim (DDB)	30
3.3. Döngüde Yazılımsal Benzetim	34
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	38
KAYNAKLAR	39

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Uçuş Simülatörü.....	3
Şekil 1.2. Antoinette Uçuş Simülatörü,1910.....	3
Şekil 1.3. Link Eğitim Cihazı.....	4
Şekil 1.4. İlk Tam Uçuş Simulatörü,1954.....	5
Şekil 1.5. FNPT II Uçuş Eğitim Simülatörü, Anadolu Üniversitesi	6
Şekil 1.6. Uçuş ve Seyrüsefer Prosedürleri Eğitim Cihazı, Alsim.....	7
Şekil 1.7. Benzetim Sadakatinin Unsurları	8
Şekil 1.8. Uçuş Simülatörü Eğitim Cihazı Sadakat Seviyeleri, ICAO 9625	9
Şekil 1.9. Sukhoi Superjet 100 Tam Uçuş Simülatörü	13
Şekil 1.10. B787 Uçuş Eğitim Cihazı	15
Şekil 1.11. Uçuş Ve Seyrüsefer Prosedürler Eğitim Cihazı (FNPT) Anadolu Üniversitesi.....	15
Şekil 1.12. Temel Aletli Uçuş Eğitim Cihazı (BITD)	16
Şekil 1.13. Duyusal Uyumsuzluk Teorisi ile Simülatör Hastalığının Oluşum Algoritması	19
Şekil 2.1. UTES Sistem Yapısı	21
Şekil 2.2. UTES Sistem Ekipmanlarının Yerleşim Algoritması	22
Şekil 2.3. Flight Simulator I Benzetim Yazılımı Görüntüsü	23
Şekil 2.4. Hava Aracını Etkileyen Kuvvetlerin Gösterimi.....	25
Şekil 2.5. X-Plane Hava Aracı Tasarım Modülü	25
Şekil 2.6. X-Plane Veri Setleri Seçim Ekranı	27
Şekil 2.7. X-Plane Veri Setlerinin Gösterimi.....	27
Şekil 2.8. UDP Veri Paketi Yapısı	28
Şekil 2.9. UTES Donanım Bileşenleri	28
Şekil 2.10. UTES'in Üç Boyutlu Görüntüsü.....	30
Şekil 3.1. Döngüde Donanımsal Benzetim Döngü Yapısı.....	32
Şekil 3.2. Geliştirme ve Test Amaçlı DDB Uygulama Algoritması	32
Şekil 3.3. Apm 2.6 ve X-Plane UDP Port Kurulum Yapısı	33
Şekil 3.4. Otopilot Test ve Geliştirme Ortamı	34
Şekil 3.5. Hava Aracı Rotasının Google Earth Programı Görüntüsü.....	34
Şekil 3.6. Geliştirme ve Test Amaçlı DYB Uygulama Algoritması	35

Şekil 3.7. UDP Port Kurulum Yapısı	36
Şekil 3.8. Matlab/Simulink UDP Veri Gönderme ve Veri Alma Bloğu	36
Şekil 3.9. Matlab/Simulink İle X-Plane Port ve IP Adresi Kurulumu	37
Şekil 3.10. Matlab/Simulink ve X-Plane Test/Geliştirme Platformu.....	37
Şekil 3.11. Veri Analizi Ekran Görüntüsü	38

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. 2012 Ve 2015 Dünya Genelinde Kullanılan Tam Uçuş Simülatörleri.....	14
Çizelge 1.2. Uçuş Simülatörlerinin Sadakat Seviyelerine Göre Sınıflandırılması	17
Çizelge 1.3. Eğitimde Gerçek/Simülatör Uçuş Saati Maliyetleri	17
Çizelge 2.1. Benzetim Yazılımları	24
Çizelge 2.2. Benzetim Yazılımlarının Değerlendirilmesi	24
Çizelge 2.3. X-Plane Benzetim Yazılımında Dahil Olan Hava Araçları	26
Çizelge 2.4. UTES Donanım Bileşenlerinin Açıklaması	29

TEŞEKKÜR

Danışmanlarım Yard. Doç. Dr. Tansu FİLİK ve Prof. Dr. Mustafa CAVCAR'a tez boyunca yaptığı katkılardan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Desteklerini esirgemeyen pilotaj bölümü baş yer dersi öğretmeni Erdoğan BÖCÜ olmak üzere tüm öğretmen pilotlarımıza teşekkür ederim.

Tez sürecinde her konuda sabırla yardımcı olan eşim Beyza SAVAŞ'a ve kızım Ayőe İnci SAVAŞ'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BET	:Blade Element Teori
BITD	:Temel Aletli Uçuş Eğitim Cihazı (Basic Instrument Training Device)
DDB	:Döngüde Donanımsal Benzetim (Hardware in the loop Simulation)
DYB	:Döngüde Yazılımsal Benzetim (Software in the loop Simulation)
FFS	:Tam Uçuş Simülatörü (Full Flight Simulator)
FNPT	:Uçuş ve Seyrüsefer Prosedürler Eğitim Cihazı (Flight Navigation Procedural Trainer)
FSTD	:Uçuş Simülatörü Eğitim Cihazlarının (Flight Simulator Training Device)
FTD	:Uçuş Eğitim Cihazı (Flight Training Device)
FTO	:Uçuş Eğitim Organizasyonu (Flight Training Organization)
ICAO	:Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu'nun
IFR	:Aletli Uçuş Kuralları (Instrument Flight Rules)
IP	:İnternet Protokolü (Internet Protocol)
LCD	:Likit Kristal Ekran (Liquid Crystal Display)
MSFS	:Microsoft Flight Simulator
PID	:Oransal-İntegral-Türevsel (Proportional,Integral,Derivative)
RAHAT	:Rafta Hazır Ticari
SHGM	:Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü
TEO	:Transfer Etkinliği Oranı (Transfer Effectiveness Ratio)
UDP	:Kullanıcı Veri Bloğu İletişim Kuralları (User Datagram Protocol)
UTES	:Uçuş Test ve Eğitim Simülatörü
VFR	:Görerek Uçuş (Visual Flight Rules)
ZFTT	:Sadece Simülatörde Yapılan Tıp İntibak Eğitimi (Zero Flight Time Training)

1. GİRİŞ

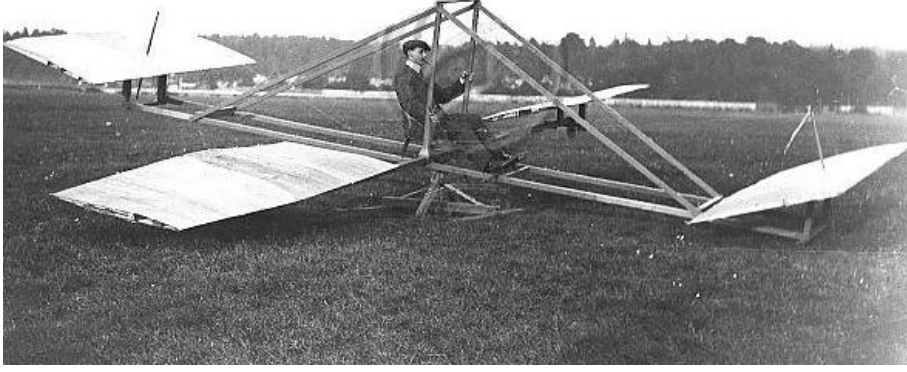
Uçuş simülatörü yeni bir hava aracının tasarımında, pilot seçimi ve eğitiminde, araştırma ve geliştirme vb. gibi amaçlar için kullanılan belirli bir hava aracının uçuşunu ve çevresel durumunu aynen yansıtan cihazlardır. Büyük ölçekli bir benzetim sistemi olan ve insanlı uçuşlardan itibaren kullanılan uçuş simülatörleri, pilotlara ve pilot adaylarına emniyetli ve kontrollü eğitim imkânı sunmaktadır.

Çalışmanın bu ilk kısmında uçuş simülatörleri ve tarihsel gelişimi, sanal ortam, benzetim sadakati, eğitim transferi ve simülatör hastalığı gibi konuya zemin oluşturan kavramlar açıklanacaktır. İkinci kısmında ise sabit kanatlı bir hava aracı için tasarlanan ve uygulanan uçuş test ve eğitim simülatörünün yapısı ve bu sistem için kullanılan yazılım ve donanım bileşen bilgileri verilecektir. Son bölümde ise ikinci kısımda bahsedilen bu sistemin, insansız hava araçları için Döngüde Donanımsal Benzetim (DDB) ve Döngüde Yazılımsal Benzetim (DYB) teknikleri ile kullanım yapısı ve bileşenleri örnek uygulamalar ile açıklanacaktır.

1.1. Tarihçe

Benzetim (Simulasyon) tarihi 5000 yıl öncesine kadar uzanmakta, Weich olarak bilinen ilk benzetimler Çin savaş oyunlarından gelmektedir. 1800'lü yıllardan itibaren ordu ve donanma stratejilerinin gelişimini sağlamak amacıyla benzetim teknikleri kullanılmıştır [1]. Günümüzde bu teknik tıp [2], eğlence [3, 4], üretim [5], havacılık [6, 7] vb. gibi farklı sektörlerde kullanılarak emniyetli ve düşük maliyetli eğitim ve geliştirme imkânı sunmaktadır. Büyük ölçekli bir benzetim sistemi olan uçuş simülatörleri, insanlı uçuşlardan itibaren pilot eğitiminde kullanılmaktadır [8]. 1910'larda yerde rüzgâra karşı oturan pilotların elleri kumandalarda olup, uçuşu süzülerek hissetmeleri böylece uçağı yanlamasına ekseninde kontrol etmeleri beklenirdi. İlk uçuş simülatörleri bir levye, bir pedal ve bir pilot koltuğundan oluşmaktaydı [9].

Kısa bir süre sonra uçuş hissini artırılması amacıyla hâkim rüzgâra karşı, yerde duran gerçek uçak üzerinde uçuş kontrollerinin öğretilmesi hedeflenmiştir. Bu simülatörler ile pilotun uçağın kontrolünü gerçek uçak ve hava şartlarında denemesi hedeflenmiş ancak gerçek hava koşulları sağlanamamıştır [10]. Bu amaçla Eardley Billing tarafından yapılan uçuş simülatörü Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



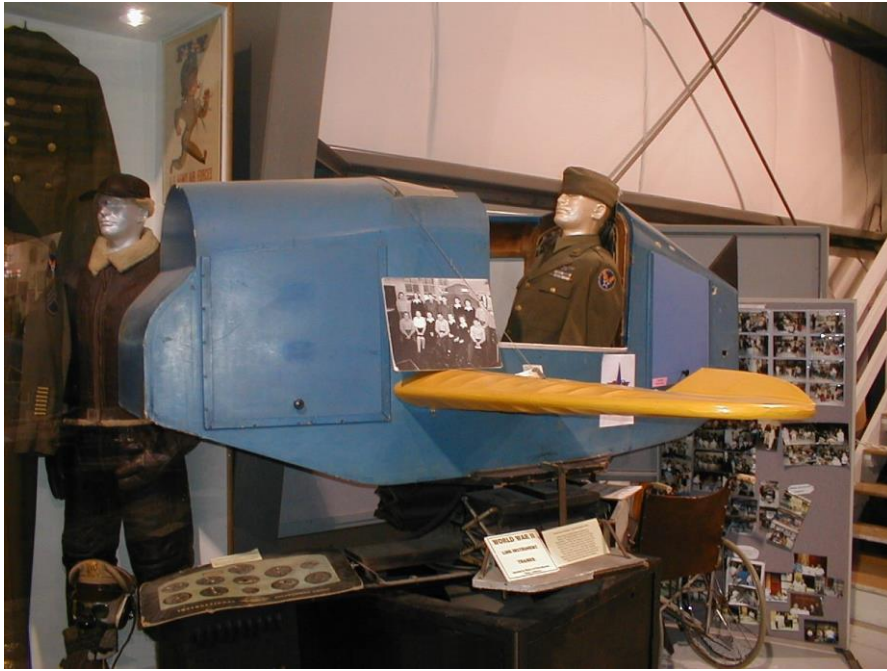
Şekil 1.1. Uçuş Simülatörü [11]

Kayda alınan ilk uçuş simülatörü ise Şekil 1.2’de gösterilen Antoinette simülatörüdür. Bu simülatör iki yarım varilden oluşmaktadır. Yunuslama (pitch) ve yuvarlanma (roll) hareketleri pilotun arkasında bulunan bir kol aracılığı ile operatör yardımıyla yapılmaktaydı. İnsan gücü ile hareket ettirilen bu simülatörde, referans çubuğunu yatay düzlemde tutmaya çalışan pilotun uçuş kontrollerini öğrenmesi hedeflenmiştir.



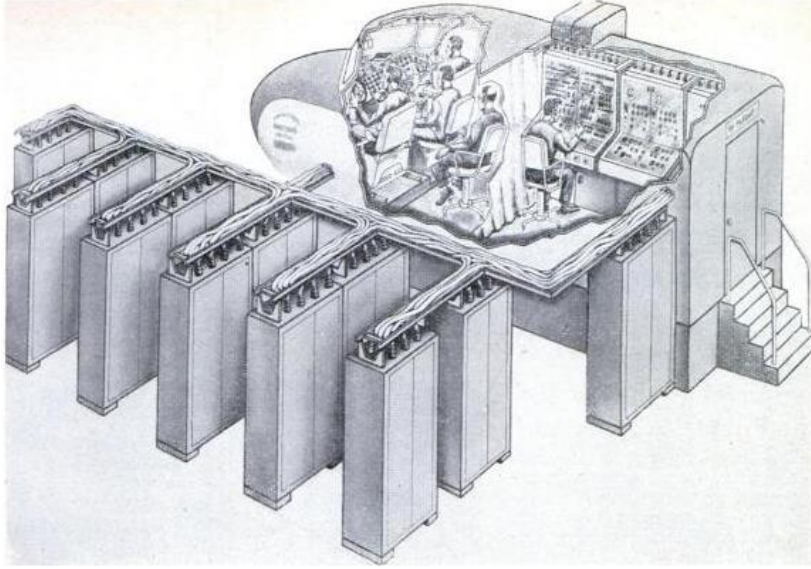
Şekil 1.2. Antoinette Uçuş Simülatörü, 1910 [9]

Birinci Dünya Savaşıyla birlikte artan pilot ihtiyacı ile gerek pilot seçiminde gerek pilot eğitiminde yeni tekniklerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu yeni tekniklerden bir tanesi insan gücüyle çalışan Antoinette uçuş simülatörünün, mekaniksel ve elektriksel eyleyiciler ile kontrol edilmesidir. Böylelikle öğrenci pilotlar verdikleri komutlara göre uçuş simülatöründe daha gerçekçi hareketler elde edebilmekteydi. Buckley tarafından 1929 yılında patenti alınan bu tip bir simülatörde hareketin yanında ayrıca ekli bir pervane ile üretilen hava da mevcuttu. Üretilen havaya karşı, hava aracının kontrolü flaplar ve irtifa dümeni ile sağlanmaktaydı. Elektrikli modelin en başarılı ve en iyi bilineni ise Edwin A.Link tarafından geliştirilmiş “Link Eğitici” dir. Link eğitici 1927-1929 yılları arasında geliştirilmiş ve “etkili bir havacılık eğitim yardımcı malzemesi ve yeni, kârlı bir eğlence aracı” olarak 1930’da patenti alınmıştır [12]. Şekil 1.3’de gösterilen Link Eğitici ile İkinci Dünya Savaşı boyunca ABD ve müttefik ülkelere yarım milyondan fazla pilotun, aletli uçuş ve seyrüsefer eğitiminde kullanılmış, mavi renkli olmasından dolayı “Mavi Kutu (Blue Box)” olarak ün kazanmıştır [9, 13].



Şekil 1.3. Link Eğitim Cihazı [14]

Öte yandan, benzetimi doğru yapılamayan hareketli simülörde pilotlar yanlış tepkilere alışkanlıklar kazanabilmekteydi. Bu nedenle, her ne kadar analog bilgisayarlar simülör sistemlerinde kullanılsa da hareket benzetiminin yetersizliği sonucu, başlangıçta sabit platformlu simülörlerin kullanımı yaygınlaşmıştır [15]. İkinci Dünya Savaşına kadar askeri alanda gelişimini sürdüren uçuş simülörleri, savaştan sonra yönünü sivil alana yöneltmiştir. İkinci Dünya Savaşı sonrasında Curtiss-Wright şirketi hareket ve görsel kabiliyeti olmayan ilk tam uçuş simülörünü 1954 yılında United Airlines'a teslim etmiştir (Şekil 1.4). İlk tam uçuş simülörünün pilot kabinini tamamen benzetmesi ve ilk defa bir sivil havayolu tarafından kullanılması sebebiyle önemlidir [14].



Şekil 1.4. İlk Tam Uçuş Simulatörü,1954 [16]

1990'lara kadar simülör teknolojileri bilgisayar teknolojilerinin gelişimi ile paralellik göstermiştir. Bilgisayarların hız ve kapasitelerindeki önemli artışlar, beraberinde simülör sistemlerinin maliyetlerinde önemli azalışlar meydana getirmiştir [13]. Günümüzde uçuş eğitim simülörleri maliyet-etken, emniyetli ve çevresel duyarlılığı dolayısıyla havacılığın ayrılmaz bir parçası olarak her aşamada kullanılmaktadır. Özellikle pilot eğitiminde emniyetli ve kontrollü bir sanal ortam sağladığından kullanımı oldukça önemlidir. Şekil 1.5'de Anadolu Üniversitesi Pilotaj eğitiminde kullanılan FNPT II (Uçuş ve Seyrüsefer Prosedürler Eğitim Cihazı) uçuş simülörü gösterilmektedir.



Şekil 1.5. FNPT II Uçuş Eğitim Simülâtörü, Anadolu Üniversitesi

1.2. Sanal Ortam

Teknolojinin giderek gelişmesi, öğrenim ve öğretim hayatında insanlara kolaylık getirmekle birlikte alternatif eğitim seçenekleri de sunmaktadır. Sanal ortam (virtual environment) ya da sanal gerçeklik (virtual reality) bu seçeneklerden bir tanesidir ve kullanımı eğitimde büyük kazanımlar sağlamaktadır.

Bilgisayarlı bir hayatın yaratıldığı, bilgisayarların birleşimi ile etkileşimli bir ara yüzün sağlandığı, bir bilgisayar teknolojileri seti olarak tanımlanan sanal ortam; kullanıcıya üç boyutta gerçek duyguların hissedilmesine imkân tanır. Böylelikle, gerçek zamanda üç boyutlu olarak sağlanan sanal ortamda etkileşimde olan kullanıcının gerçek zamanlı hareket ve tepkileri ölçülebilmektedir [17]. Uçuş simülâtörleri, havacılık sektöründe pilot eğitiminde kullanılan sanal ortamlardır (Şekil 1.6). Uçuş simülâtörleri ile gerçek uçuş operasyonunda pilot adayına verilmesi zor olan koşullar (motor arızası, motor yangını, uçuş kontrol sistemlerinde arıza, farklı meteorolojik şartların yaratılması, olağanüstü hal ve durumlar vb.) sağlanarak eğitimin gerçeğe yakın şekilde verilmesine imkân tanınmaktadır [18].



Şekil 1.6. Uçuş ve Seyrüsefer Prosedürler Eğitim Cihazı, Alsim [19]

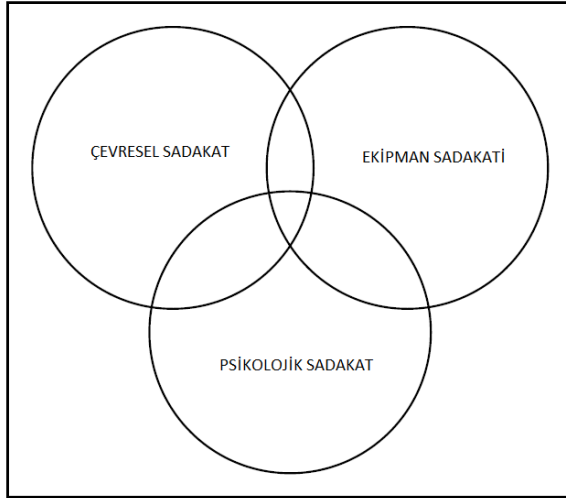
1.3. Benzetim

Benzetim (simulation) gerçekte mevcut olan görevlerin, ilişkilerin, fenomenlerin, ekipmanların, davranışların ya da bazı bilişsel aktivitelerin taklit edilmesi şeklinde tanımlanmaktadır [20]. Ayrıca benzetim gerçek ya da hayali bir sistemin modellenmesi ve bu modeller ile deneyler yapma süreci olarak açıklanmaktadır [21]. Diğer bir tanıma göre benzetim bir sürecin, bir sistemin, bir olay ya da durumun başka bir süreç, sistem, olay ya da durum ile modelleyerek yapay gösterimidir [22]. Benzetim sistemleri gerçek zamanlı ya da gerçek olmayan zamanlı olabilir. Gerçek zamanlı sistemler, belirli bir işlevi veya görevi önceden belirlenmiş bir sürede ve bu süre zarfında doğru bir şekilde gerçekleştirmeleri gereken sistemler olarak tanımlanmaktadır. Gerçek zamanlı sistemlerde zaman önemli bir husustur. Gerçek zamanlı olmayan sistemler ise benzetimi yapılan zaman ile gerçek zamanın aynı olmadığı sistemlerdir. Gerçek olmayan sistemlerde zaman kısıdı söz konusu değildir. Gerçek zamanlı sistemlere örnek olarak bir hava aracı üzerindeki otopilot sistemleri verilebilir. Otopilot sistminin belirli sürelerde uçağın durumunu izlemesi, ilgili algılayıcıları okuması ve uçağı dengede tutacak sinyalleri eyleyicilere iletmesi gerekmektedir. Kontrol sistemindeki en ufak bir gecikme uçağın dengesinin bozulmasına ve sonuçta istenmeyen durumların oluşmasına neden olabilir [23].

Günümüzde bilgisayar teknolojilerinin hızlı gelişmesi gerçek zamanlı benzetimlerin birçok sektörde olduğu gibi havacılık eğitiminde de daha etkili rol almasına olumlu katkıda bulunmuştur. Gerçek zamanlı benzetim sistemlerine verilebilecek en güzel örnek uçuş simülatörleridir.

1.4. Benzetim Sadakati

Benzetim sadakati (simulation fidelity) bir sistem veya bir hava aracının sanal ortama benzetim derecesidir ve genellikle yüksek dereceli sadakate sahip uçuş eğitim cihazlarının yüksek maliyetli olmaları beklenmektedir. Diğer bir tanıma göre ise benzetim sadakati; gerçek bir hava aracı üzerindeki prosedürlerin, ekipmanların ya da yeteneklerin eğitiminin, uçuş simülatörü üzerindeki eğitime benzerlik derecesidir. Uçuş eğitim simülatörünün benzetim sadakati ise çevresel sadakat, ekipman sadakati ve psikolojik sadakatten oluşmaktadır (Şekil 1.7) [24]. Benzetim sadakati, kullanıcının benzetimi yapılan sistemi ne kadar gerçeğe yakın hissettiği ile ilgilidir.



Şekil 1.7. Benzetim Sadakatinin Unsurları [24]

Çevresel sadakat, gerçekteki bir sistemin ışığı, gürültüyü, görselliği, hareketi vb. gibi unsurları sanal ortamdaki benzetimine ne kadar yakın olduğudur. Ekipman sadakati, gerçekteki bir sistemin ekipmanlarının (levye, pedal vb. gibi) sanal ortamdaki benzetiminin ne kadar yakın olduğudur. Son olarak psikolojik sadakat ise üzerinde eğitim alan kullanıcının (öğrenci pilot, öğretmen pilot vb.) uçuş simülâtörünün ne kadar “gerçeklik” hissini algıladığı ile ilgilidir [24]. Yüksek dereceli benzetim sadakatine sahip bir uçuş simülâtörü için bu üç sadakatin de yüksek olması beklenmektedir.

Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu ICAO'nun [25] 2009 yılında yayınladığı 9625 dokümanına göre uçuş simülâtörü eğitim cihazlarının (FSTD-Flight Simulator Training Device) dört adet sadakat seviyeleri vardır. Şekil 1.8’de gösterilen sadakat seviyeleri; belirli bir uçuş simülâtörü eğitim cihazı özelliği için gerekli olan sadakatin en düşük seviyesi Genel (Generic), orta düzeydeki seviyesi Temsili (Representative) ve en üst düzeydeki seviyesi Özel (Specific) olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir özelliğin gerekli olmadığı sadakat seviye ise Hiçbirisidir (None). Bu dört sadakat seviyesi eğitimin verileceği uçuş simülâtöründe gerekli olan benzetimin asgari sadakat kriterlerini tanımlamaktadır.



Şekil 1.8. Uçuş Simülâtörü Eğitim Cihazı Sadakat Seviyeleri, ICAO 9625 [25]

1.5. Eğitim Transferi

Eğitim, bireylerin davranışlarında belli gelişmeler sağlamaya yarayan, önceden tasarlanan planlı programları içermektedir. Eğitim, bireyin davranışlarında değişme meydana getirme sürecidir [26]. Eğitim süreci öncesinde planlama ve sonrasında değerlendirme sürecini kapsamaktadır. İyi bir planlama ve değerlendirme sürecine sahip eğitim programlarında, eğitimin başarılı olacağı düşünülebilir. Ancak başarılı bir eğitim programının yeni öğrenilen bilgi ve

becerileri iş hayatına transfer edileceği garanti edilememektedir. Bu da araştırmacıları transfer sürecini anlamaya yöneltmiştir [27].

Eğitim transferi bir alanda elde edilen bilgi ve yeteneklerin, diğer bir alanda bilgi edinme ve problem çözmedeki etkisidir. Daha önce öğrenilenlerin, gerçek durumlarda kullanımında eğitim transferi meydana gelmektedir [28]. Havacılıkta eğitim transferi, simülasyon eğitiminin etkinliğinin bir göstergesidir. Herhangi bir durumda öğrenilen yeteneklerin, benzer durumlarda aktarılması olan eğitim transferi, yeni yeteneklerin gelişimini ve öğrenimi engelleyebilir ya da yardım edebilir [29].

Eğitim transferinin üç yönlü çıktısı vardır. Bunlar negatif, pozitif ve sıfır eğitim transferleridir. Pozitif eğitim transferi, “A” üzerinde yapılan eğitimin, “B” üzerindeki performansları geliştirmesidir. Negatif eğitim transferi, “A” üzerinde yapılan eğitimin “B” üzerindeki performansları olumsuz etkilemesidir. Sıfır eğitim transferi ise “A” üzerinde yapılan eğitimin “B” üzerindeki performansları hiç etkilememesidir [30].

1.5.1. Eğitim Transferinin Değerlendirilmesi

Havacılıkta, öğrencilere yeteneklerin ve prosedürlerin gerçek hayata aktarılmasında pozitif eğitim transferi amacıyla uçuş simülasyonları kullanılmaktadır. Eğitim transferi, transfer etkinliği oranı (TEO) ile ölçülmektedir [11].

$$TEO = \frac{Y_C - Y_X}{X} \quad (1.1)$$

Eşitlik (1.1)'de gösterilen kısaltmalar şu şekildedir:

- Y_C : Uçuş simülasyon eğitimi almadan gerçek uçak üzerindeki eğitim süresi
- Y_X : Öncesinde uçuş simülasyon eğitimi alarak yapılan gerçek uçak üzerindeki eğitim süresi
- X : Uçuş simülasyonu ile yapılan eğitim süresi

TEO, uçuş simülatörü eğitimi ile harcanan zamanın gerçek uçak üzerinde yapılan eğitim süresinde ne kadar tasarruf elde edileceğini karşılaştıran bir orandır. TEO'nun pozitif olması uçuş simülatöründe yapılan eğitimin gerçek uçağa aktarılmasında etkili olduğunu göstermektedir. Örneğin TEO + 2.0 ise simülatör üzerinde yapılan her bir saat eğitim, gerçek uçak üzerinde yapılan eğitimde 2 saat tasarruf sağladığı anlamına gelmektedir. Stewart ve ark. [31] uçuş eğitiminin başlangıç safhasındaki askeri öğrenciler üzerine yaptığı çalışmada, yüksek dereceli görsel sadakate sahip simülatörlerde, yüksek TEO oranı elde etmişlerdir. Diğer bir çalışmada ise başlangıç safhasındaki 68 öğrenci pilot, % 40'ı Cessna 172SP ile gerçek uçuşta ve % 60'ı Seviye 6 Cessna 172 uçuş eğitim cihazında eğitim almak üzere iki gruba ayrılmış ve yapılan TEO analizinde pozitif oran elde edilmiştir [32].

1.6. Uçuş Eğitim Simülatörleri

Havacılıkta önemi yüksek olan uçuş simülatörleri, pilot ve pilot adaylarına eğitim imkânı sunmaktadır. Uçuş simülatörleri, gerçek uçuşa geçmeden önce pilot adaylarının:

- Uçağı limitleri dahilinde idare edebilmesi,
- Tüm manevraları düzgün ve tam olarak tamamlayabilmesi,
- İyi bir havacı olarak doğru karar verebilmesi,
- Havacılık bilgisini uygulayabilmesi,
- Bir prosedür ya da manevranın sonucunun başarılı olacağına şüphe bırakmayacak şekilde her zamana uçağın kontrolünü elinde tutması,
- Uçuş ekibi koordinasyonu ve sağlık açısından zayıf düşmesi durumundaki prosedürleri anlayabilmesi ve uygulayabilmesi,
- Diğer uçuş ekibi ile etkin biçimde haberleşebilmesi [33],

vb. gibi uçuş eğitiminde faydalı kabiliyetler kazanması amaçlanmaktadır. Tecrübeli pilotların bilgi ve yeteneklerinin taze kalması için de uçuş simülatörleri kullanılmaktadır. Yukarıda sayılmayan fakat gerçek uçuş koşullarında karşılaşılabilecek başka uçuş senaryoları da uçuş simülatörleri ile sanal ortamda gerçekleştirilerek öğrenci pilotların farklı koşul ve şartlarda hazırlıklı olması sağlanmaktadır.

1.6.1. Tanım

Uçuş simülatörü Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) tarafından yayınlanan SHY-1 yönetmeliğinde şu şekilde tanımlanmaktadır [33]:“Belirli bir hava aracı tipinin kokpitindeki mekanik, elektrik, elektronik ve benzeri hava aracı sistem kontrol fonksiyonlarını ve uçuş ekibi üyelerinin ortamını aynen yansıtan ve hava aracı tipinin performans ve uçuş özelliklerinin gerçeğindeki gibi uygulandığı cihaz” dır.

Uçuş simülatörü yeni bir hava aracının tasarımında, pilot seçimi ve eğitiminde, araştırma ve geliştirmede vb. gibi amaçlar için kullanılan belirli bir hava aracının uçuşunu ve çevresel durumunu aynen yansıtan cihazlardır [34] .

1.6.2. Uçuş Simülatörlerinin Sınıflandırılması

Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı EASA'nın 2012 yılında yayınladığı CS-FSTD dokümanına göre uçuş simülatörü eğitim cihazları (Flight Simulator Training Device-FSTD) 4'e ayrılmaktadır [35];

- Tam Uçuş Simülatörü (Full Flight Simulator-FFS)
- Uçuş Eğitim Cihazı (Flight Training Device-FTD)
- Uçuş ve Seyrüsefer Prosedürler Eğitim Cihazı (Flight and Navigation Procedures Trainer-FNPT)
- Temel Aletli Uçuş Eğitim Cihazı (Basic Instrument Training Device-BITD)

Tam Uçuş Simülatörü (FFS), hava aracını yer ve uçuş operasyonlarında yansıtmak üzere gerekli olan tüm teçhizat ve bilgisayar programlarının, kokpitten dışarısının görünümünü sağlayan bir görsel sistemin teçhiz edilmiş olması dâhil olmak üzere, özellikli bir tipte veya markada, modelde ve seride hava aracı kokpitinin tam boyutta birebir aynısıdır. Ayrıca bir güç işaretine dayalı hareket sistemi içerir (Şekil 1.9) [36]. Seviye D tam uçuş simülatörü en yüksek sadakat kriterlerine sahiptir ve sadece simülatörde yapılacak tip intibak eğitimi (Zero Flight Time Training-ZFTT) için kullanılmaktadır [37].



Şekil 1.9. Sukhoi Superjet 100 Tam Uçuş Simülatörü [37]

Boing [38] firması tarafından 2015-2034 yılları için yapılan analizde, gelecekteki 20 yıl içerisinde 38.050 yeni hava aracının sektöre gireceği tahmin edilmektedir. Bu periyod zarfında dünya genelinde 27.000 yeni pilotun ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir. Bu kadar büyük bir pilot ihtiyacı beraberinde uçuş simülatörlerinin eğitimde kullanımının önemini artırmaktadır. Çizelge 1.1’de 2012 [39] ve 2015 [40] yılları baz alınarak yapılan çalışmada, dünya genelinde kullanılan tam uçuş simülatörlerinin sayısal durumu verilmiştir. Çalışmaya göre bu yıllar arasında dünya çapında toplam tam uçuş simülatör sayısı yaklaşık % 12 oranında (154 adet) artmıştır. Türkiye’de mevcut tam uçuş simülatör kapasitesini iki adet artırarak 16’ya yükseltmiştir.

Çizelge 1.1. 2012 ve 2015 Dünya Genelinde Kullanılan Tam Uçuş Simülatörleri [39, 40]

2012			2015		
Simülatör Sayısı	Ülke	Oran (%)	Simülatör Sayısı	Ülke	Oran (%)
561	ABD	42.7	553	ABD	38.7
86	İngiltere	6.5	127	Çin	8.9
79	Çin	6	89	İngiltere	6.2
51	Fransa	3.9	57	Fransa	4.0
43	Kanada	3.3	48	Almanya	3.4
41	Almanya	3.1	47	Kanada	3.3
32	Japonya	2.4	44	BAE	3.1
30	Avustralya	2.3	34	Japonya	2.4
27	Hollanda	2.1	31	Hollanda	2.2
26	BAE	2	29	Avustralya	2.0
19	Rusya	1.4	24	Singapur	1.7
18	İtalya	1.4	21	Kuzey Kore	1.5
16	İspanya	1.2	19	Endonezya	1.3
16	Brezilya	1.2	19	Rusya	1.3
16	Singapur	1.2	18	İspanya	1.3
16	Kuzey Afrika	1.2	18	Malezya	1.3
16	Kuzey Kore	1.2	18	Brezilya	1.3
15	Malezya	1.1	17	Tayland	1.2
14	Türkiye	1.1	16	İtalya	1.1
13	İsveç	1	16	Türkiye	1.1
12	Hindistan	0.9	15	Hindistan	1.0
12	Endonezya	0.9	13	Kuzey Afrika	0.9
11	Suudi Arabistan	0.8	12	Tayvan	0.8
10	Tayvan	0.8	12	Meksika	0.8
136	Diğer Ülkeler	10.3	11	İsveç	0.8
1318	Toplam	100	10	Yeni Zelanda	0.7
			154	Diğer ülkeler	10.5
			1472	Toplam	100

Uçuş Eğitim Cihazı (FTD), yer ve uçuş koşullarını birebir yansıtır ve özellikli bir hava aracı tipinin kokpitindeki aletlerinin, teçhizatının, panellerinin ve kumandalarının tam boyutta birebir aynısıdır. Hareket sistemine gerek duymamaktadır (Şekil 1.10) [36].



Şekil 1.10. B787 Uçuş Eğitim Cihazı [41]

Uçuş ve Seyrüsefer Prosedürler Eğitim Cihazı (FNPT), bir hava aracı tipini veya sınıfını uçuş operasyonlarında yansıtmak üzere gerekli olan teçhizatın ve bilgisayar programlarının teçhiz edilmesi dahil olmak üzere, kokpiti veya kokpit ortamını yansıtan eğitim cihazıdır (Şekil 1.11) [36]. Sabit platformlu olan bu tip simülatorlerde seyrüsefer usul ve tekniklerine ilişkin yöntemler verilir. Genellikle IFR/VFR eğitimleri için kullanılmaktadırlar [42].



Şekil 1.11. Uçuş ve Seyrüsefer Prosedürler Eğitim Cihazı (FNPT), Anadolu Üniversitesi

Temel Aletli Uçuş Eğitim Cihazı (BITD), öğrenci pilotun bir uçak sınıfındaki görev yerini temsil eden yer bazlı bir eğitim cihazıdır. En azından aletli uçuşun usule ilişkin özelliklerine yönelik bir eğitim platformu sunmak amacı ile ekran bazlı alet panellerinden ve yay yüklü uçuş kumandalarından oluşmaktadır (Şekil 1.12) [36].



Şekil 1.12. Temel Aletli Uçuş Eğitim Cihazı (BITD) [43]

1.6.3. Uçuş Eğitim Simülatörlerinin Sadakat Seviyeleri

CS-FSTD [35] dokümanına göre uçuş simülatörleri eğitim cihazları, sadakat kriterlerine göre seviyelendirilmiştir (Çizelge 1.2). Uçuş eğitimin belirli bir kısmı yukarıda belirtilen sadakat seviyelerine göre uçuş eğitim simülatörlerinde yapılmakta, aynı zamanda yapılan simülatör eğitimi gerçek uçuş olarak sayılmaktadır. Örneğin hususi pilot lisansı (Personal Pilot Licence-PPL) almak isteyen bir aday SHGM tarafından yetkilendirilmiş bir uçuş eğitim organizasyonunda veya tescilli kuruluştaki en az 45 saatlik uçuş süresinin tamamlanmış olması gerekir. Bu sürenin en çok 5 saati BITD’de, FNPT’de veya uçuş simülatöründe (FFS) tamamlanmış olabilir. Entegre ticari pilot lisansı ve aletli uçuş yetkisi kursu almak isteyen bir aday, onaylı bir uçuş eğitim organizasyonunun eğitim müdürünün denetimi ve sorumluluğunda, FTO (Uçuş Eğitim organizasyonu) tarafından düzenlenen onaylı kursun tüm safhalarını ara vermeden tamamlamalıdır. Tip intibak eğitimini içermeyen uçuş eğitimi, toplam en az 180 saattir. Bunun 50

saatlik aletli uçuş eğitimi FNPT I’de yapılmışsa 25 saate kadarı, FNPT II veya uçuş simülatoründe (FFS) yapılmışsa 40 saate kadarı aletli yer süresi olabilir [33].

Çizelge 1.2. Uçuş Simülatorlerinin Sadakat Seviyelerine Göre Sınıflandırılması

	FFS	FTD	FNPT	BITD
Seviye	D	2	MCC	-
	C	1	II	-
	B	-	I	-
	A	-	-	-

1.6.4. Uçuş Eğitim Simülatorlerinin Faydaları

Uçuş simülatorlerinin gerçekte yapılması mümkün olmayan fakat karşılaşılması olağan koşulların emniyetli ve düşük maliyetli olarak gerçekleştirilmektedir. Uçuş simülatorleri gerçek hava koşullarından bağımsız olarak 24 saat eğitim imkânı sunmaktadır. Uçuş simülatorleri emniyetli ve kontrollü bir sanal ortamda, daha fazla pratik yapma imkânı sunmaktadır Eğitim emniyetli ve kontrollü sanal ortamda gerçekleştiğinden çevreye duyarlıdır. Böylelikle uçuş simülatorleri havacılık eğitiminde önemli ekonomik faydalar sağlamaktadır. Tam uçuş simülatorlerinin saatlik maliyetleri üzerine yapılan bir çalışmada, gerçek uçuştaki saatlik maliyetlere göre ortalama 17 kat daha az olduğu görülmektedir (Çizelge 1.3) [44]. Uçuş simülatorleri ayrıca yeni prosedür veya yeni bir ekipmanın denenmesi için kullanılan bir araştırma aracıdır.

Çizelge 1.3. Eğitimde Gerçek/Simülator Uçuş Saati Maliyetleri

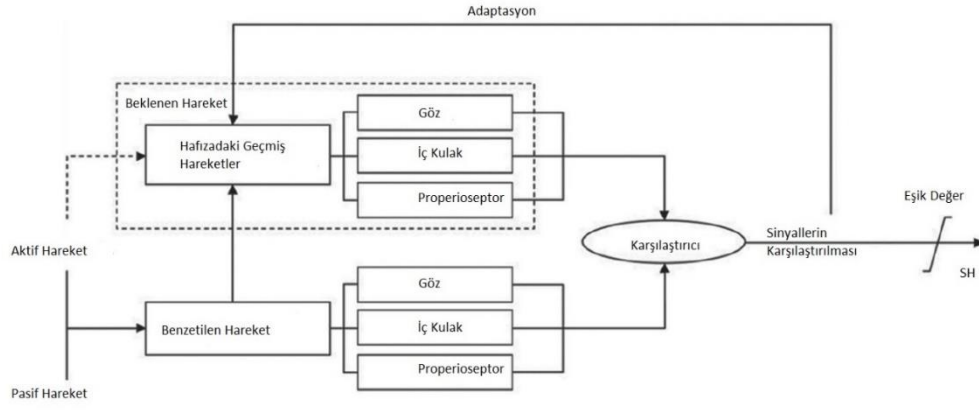
Hava Aracı	Gerçek Uçuş Saati Maliyeti	Simülator Uçuş Saati Maliyeti	Oran
F-16	\$5.000	\$500	10/1
FA-18A	\$3.955	\$217	18/1
P-3C	\$2.903	\$119	24/1
S-3A	\$4.360	\$143	30/1
SH-60B	\$1.724	\$118	15/1
CH-47	\$3.000	\$435	7/1
Ortalama Oran			17/1

1.7. Simülator Hastalığı

Bilgisayar teknolojilerinin hızlı gelişmesi, benzetim sadakati yüksek uçuş simülatorlerinin, eğitiminin pozitif transferinde kullanılmasını sağlamıştır. Uçuş simülatorleri eğitimin pozitif transferini sağlarken aynı zamanda düşük maliyetli ve çevresel duyarlılığa sahip bir sanal ortam oluşturmaktadır. Uçuş Simülatorlerinin havacılık sektörüne bu kadar faydasının yanında simülator hastalığı (simulator sickness) olarak bilinen bir dezavantajı da mevcuttur. 1950'li yıllarda hareketli platformların uçuş simülatorlerine eklenmesiyle bu kavram ortaya çıkmıştır.

Havron ve ark. [45] hareketli platforma sahip bir simülator üzerinde yaptığı çalışmada, uçuş simülatorlerinin kullanıcıları olumsuz yönde etkileyen simülator hastalığını; önemli bir sorun olarak tanımlamıştır. Simülator hastalığı, uçuş simülatorü eğitimi sırasında ve sonrasında öğrenci ve öğretmen pilotlarda görülen etki ve semptomlar olarak açıklanmaktadır. Simülator hastalığı, hareket hastalığının özel bir formudur. Hareket hastalığı hareket sonucunda ortaya çıkarken; simülator hastalığını uçuş simülatoründe hareketin yeterince benzetimin yapılamamasından kaynaklanmaktadır. Simülator hastalığı, hareket hastalığının özel bir formu olduğundan, hareket hastalığının alt belirtilerini içermektedir. Genel rahatsızlık, terleme, bulantı, baş ağrısı ve yorgunluk vb. gibi etkiler simülator hastalığının genel belirtileridir [18, 46].

Simülator hastalığının oluşumu duyuşal uyumsuzluk teorisi ile açıklanmaktadır. Sabit platforma sahip bir simülatorde hareket, kullanıcıların görsel sistemleri ile algılanıp, vestibüler sistemlerce algılanamamaktadır. Hareketli platforma sahip simülatorlerde ise vestibüler sistemdeki daha önce kaydedilmiş hareket, benzetimi yapılan aktif hareketlerle uyuşmaz, böylece simülator hastalığı oluşmaktadır [47]. Şekil 1.13'de duyuşal uyumsuzluk teorisi ile simülator hastalığının oluşum algoritması gösterilmektedir [18].



Şekil 1.13. Duyusal Uyumsuzluk Teorisi ile Simülâtör Hastalığının Oluşum Algoritması

Eğitime pozitif katkısı olan uçuş simülâtörlerinin tasarımı ve gelişiminde simülâtör hastalığı, öğrenci ve öğretmen pilotları etkileyen ve dikkate alınması gereken bir sorundur. Simülâtör hastalığı uçuş simülâtör eğitiminin başlamadan önce ve sonrasında yapılan simülâtör hastalığı anketi ile ölçülmektedir [18].

2. UÇUŞ TEST VE EĞİTİM SİMÜLATÖRÜ (UTES)

2.1. Giriş

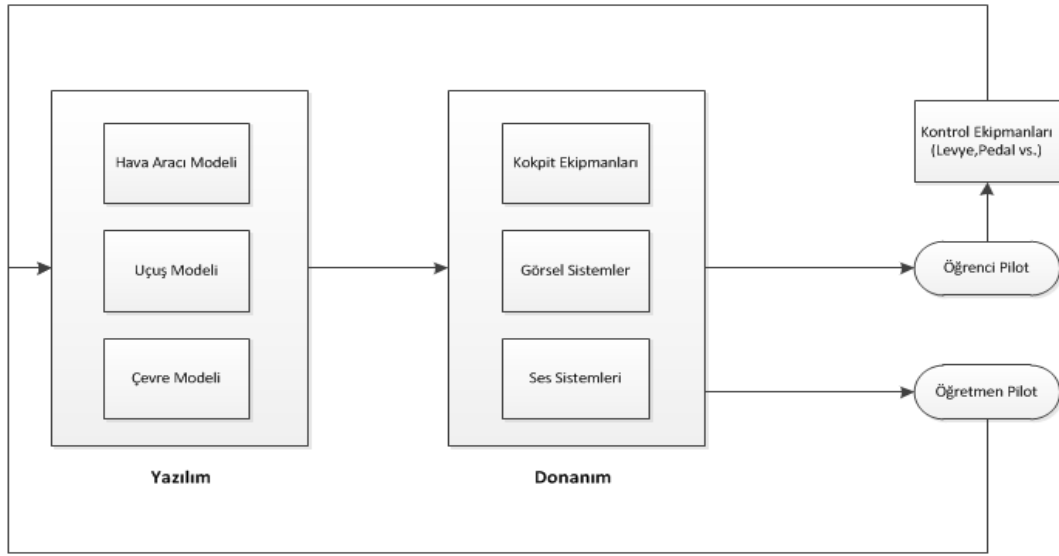
Günümüzde uçuş simülatörleri, benzetim yazılımlarının geliştirilmesi, uçuş mürettebatı eğitimi, insan faktörleri ve uçuş kontrol ekipmanlarının geliştirilmesi vb. gibi araştırma ve eğitim amacıyla sıkça kullanılmaktadır. Araştırma simülatörleri insan-makine etkileşimi, elektronik konfigürasyon, insan algısı ve benzetim etkisinin incelenmesi vb. gibi araştırma konularının uygulandığı cihazlardır. Eğitim simülatörleri ise ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşlarca sertifikalı edilmiş eğitim hizmeti veren cihazlardır. Araştırma simülatörleri, eğitim simülatörlerinin başlangıç ve geliştirme platformlarıdır. Simülatör sistemlerinin bileşenleri, entegrasyonu ve maliyetleri göz önüne alındığında, farklı konfigürasyondaki araçların bir arada modellenmesini sağlayan simülatörlere olan ihtiyaç giderek artmaktadır [48].

Havacılık eğitiminde, uçuş simülatörlerinin pozitif eğitim transferi sağladığı bilinmektedir. Üç yönlü çıktısı olan eğitim transferinin, benzetim sadakati ile çok yakından ilgilidir. Yüksek sadakatli uçuş simülatörleri, pozitif ve yüksek seviyelerde eğitim transferi gerçekleştirmektedir. Fakat yapılan çalışmalar, düşük sadakatli uçuş simülatörlerinin başlangıç pilot eğitiminde pozitif eğitim transferi sağlayacağını göstermiştir [49]. Çalışmanın bu kısmında geliştirilen uçuş simülatörünün yapısı ve bu sistemin yazılımsal ve donanımsal bileşenleri incelenecektir.

2.2. Uçuş Test ve Eğitim Simülatörünün Yapısı

Geçmişte teknolojinin getirdiği kısıtlar, sadece özel bilgisayarların simülatörlerde kullanımına izin verirken; günümüz teknolojisindeki bilgisayarlar yüksek sadakatli ve düşük maliyetli uçuş simülatörlerinin yapımına imkân vermektedir. Rafta hazır ticari (RAHAT) yazılım ve donanımların kullanılması da maliyetlerin düşürülmesini ve uçuş simülatörü geliştirme sürelerinin azaltılmasını sağlamaktadır [8].

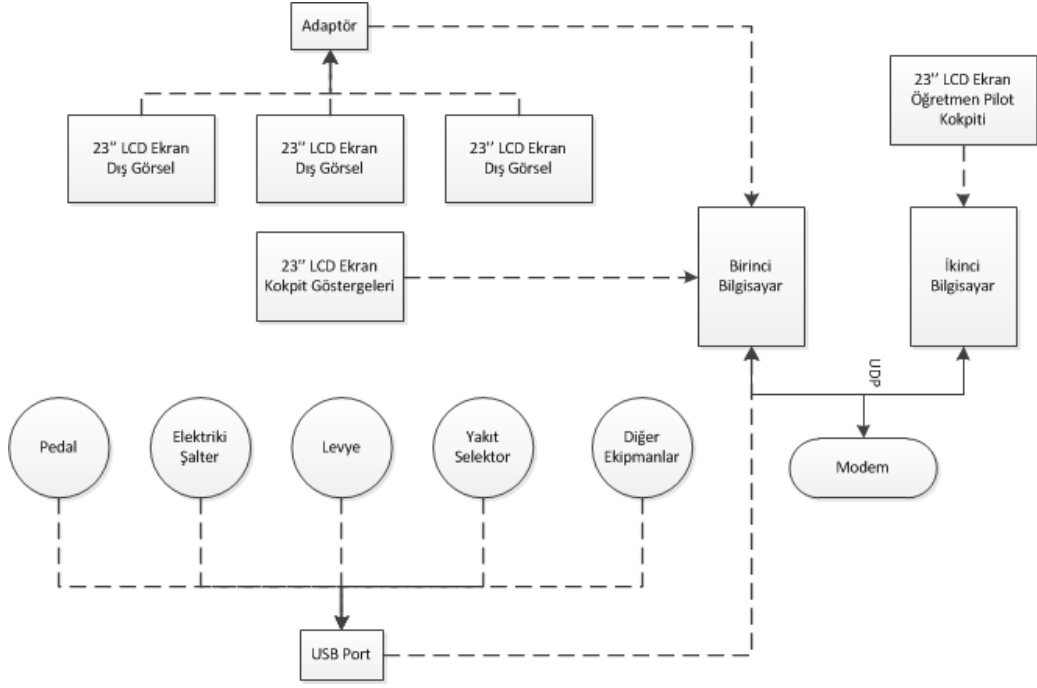
Anadolu Üniversitesi Bilimsel Projeler Komisyonu tarafından desteklenen 1410F419 nolu proje kapsamında, Cessna 172 tipindeki bir hava aracı için yazılımsal ve donanımsal bileşenleri içeren, düşük maliyetli bir sanal ortam geliştirilmiştir. Uçuş Test ve Eğitim Simülatörü (UTES) ismiyle geliştirilen sanal ortamın sistem yapısı Şekil 2.1’de gösterilmektedir. UTES, hem eğitim hem de araştırma amaçlı kullanılabilir bir benzetim ortamıdır.



Şekil 2.1. UTES Sistem Yapısı

UTES sistem yapısı, üzerinde çalışan öğrenci pilot platformu ve öğrenci pilotu izleyen ve gerektiğinde olağan dışı koşulları oluşturup öğrenciyi değerlendiren öğretmen platformundan oluşmaktadır. Öğrenci platformu, yazılımın üzerinde çalıştığı yüksek performanslı bir bilgisayar, dış görseller için 4 adet LCD ekran ve kontrol ekipmanlarından (levye, pedal, elektrikli şalter, vb.) oluşmaktadır. Öğretmen platformu ise öğrenci pilotun performansının izlendiği ve gerektiğinde dışarıdan komut vermeye yarayan bir diz üstü bilgisayar ve bir LCD ekrandan oluşmaktadır (Şekil 2.2). İki bilgisayar ortak bir ağa bağlı modem üzerinden UDP (Kullanıcı Veri bloğu İletişim Kuralları) ile haberleşmektedirler. Öğrenci platformun bir ekranı kokpit göstergeleri ve aviyonik panellerin gösterilmesinde kullanılmıştır.

Modüler yapıda olan UTES, istenilen uçak tipine göre tasarımı yapılabilmektedir. Bu çalışmada yazılımsal ve donanımsal bileşenlerde maliyet ve zaman tasarrufu sağlaması amacıyla RAHAT ürünler tercih edilmiştir. Geliştirilen bu sistemin yazılım ve donanım bileşenleri ilerleyen bölümlerde detaylandırılmıştır.



Şekil 2.2. UTES Sistem Ekipmanlarının Yerleşim Algoritması

2.3. UTES Sisteminin Yazılım ve Donanım Bileşenleri

UTES yazılım ve donanımsal bileşenlere sahip, istenilen hava aracı için yeniden yapılandırılabilir ve düşük maliyetli bir uçuş simülatörüdür. Bu kısımda uçuş benzetim yazılımlarının gelişimi, seçilen yazılım ve UDP haberleşme protokolünün özellikleri ile geliştirilen sistemde kullanılan donanımsal bileşen bilgileri verilmiştir.

2.3.1. Uçuş Benzetim Yazılımları

Dijital teknolojinin hızla gelişmesi uçuş simülatör yazılımlarının da hızla gelişmesini sağlamış, gerek endüstriyel ve gerek ticari amaçlı bir çok uçuş benzetim yazılımının ortaya çıkmasına neden olmuştur. MSFS (Microsoft Flight

Simulator) [50] , X-Plane [51] ve Flight Gear [52] eğlence, eğitim ve araştırma amaçlı kullanılan benzetim yazılımlarına örneklerdir.

1910'lu yıllarda insan gücüyle çalışan uçuş simülatörlerinin yerini 1950'lerde elektromekanik simülatörler almış fakat görsel benzetim yetersizliği pilotların uçuşu gerçekçi hissedememelerine neden olmuştur. Bu yetersizliği gidermek ve daha gerçekçi uçuş elde etmek için kullanılan uçuş benzetim yazılımları, havacılıkta önemli bir rol üstlenmiştir [53].

1970'lerde elektrik mühendisi olarak mezun olan Bruce Artwick yüksek lisans tezi çalışmasında bir uçağın uçuş modelinin bir bilgisayar ekranında göstererek, gerçek zamanlı uçuş benzetimini gerçekleştirmiştir. Çalışmasında ilk kullanılabilir mikro işlemci üzerinde, gerçek zamanlı uçuş benzetimi için gerekli olacak bir bilgisayar ekranının grafik ve aritmetiğinin beraber çalışabileceğini göstermiştir. Böylece yaptığı çalışma ile uçuş simülatör yazılımlarının öncüsü olmuştur. 1980'de "Flight Simulator 1" pazara girmiş (Şekil 2.3), 2000'li yıllarda "Microsoft Flight Simulator 2000" adıyla üretilen uçuş simülatör yazılımı 21 milyondan fazla satış gerçekleştirmiştir [54].



Şekil 2.3. Flight Simulator I Benzetim Yazılımı Görüntüsü [54]

1980'lerde MSFS'nin simülatör piyasasına girmesi ve yüksek satışlar gerçekleştirmesi, o alanda birçok firmanın (Çizelge 2.1) iştahını kabartmıştır. Günümüzde ayakta kalan ve dünyanın en kapsamlı ve gelişmiş uçuş simülatör yazılımlarından biri X-Plane'dir [55]. X-Plane 1993 yılında Laminar Research firmasınınca piyasaya sürülmüştür. Kullanılan eklentiler ile dışarıdan müdahaleye imkân tanımakta ve gerçek pilotlarca sürekli güncellenmektedir.

Çizelge 2.1. Benzetim Yazılımları

X-Plane
Flight Gear
Microsoft Flight Simulator
Prepar3D
Presagis
Digital Combat Simulator
Webots
Unity

2.3.2. X-Plane

Craighead ve ark. [56] benzetim yazılımlarının fiziksel ve fonksiyonel sadakat, kullanım kolaylığı ve maliyet açısından yaptıkları incelemede üç uçuş benzetim yazılımı ön plana çıkmaktadır (Çizelge 2.2). Bu yazılımlar Flight Gear, Microsoft Flight Simulator ve X-Plane'dir. Çoğu araştırmacı bu üç yazılımı Matlab/Simulink gibi yazılımlarla entegre ederek kararlılık türevlerinin kontrol ve test edilmesinde görsel arayüz olarak kullanmaktadırlar [57].

Çizelge 2.2. Benzetim Yazılımlarının Değerlendirilmesi

Benzetim Yazılımları	Fiziksel Sadakat	İşlevsel Sadakat	Kullanım Kolaylığı	Maliyet
USARSim	Yüksek	Orta	Orta	Orta
X-Plane	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta
FlightGear	Yüksek	Orta	Orta	Düşük
MS Flight Simulator	Yüksek	Orta	Orta	Orta
Webots	Orta	Orta	Orta	Orta
Player/Stage/Gazebo	Orta	Düşük	Yüksek	Orta
MS Robotics Studio	Yüksek	Yüksek	Orta	Düşük
MATLAB/Simulink	Düşük	Orta	Orta	Yüksek
Unity	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek

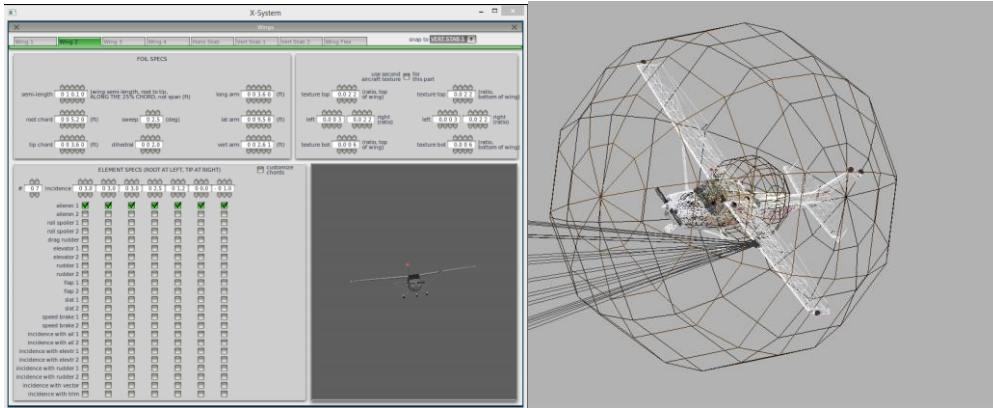
Çizelge 2.2'deki yazılımlar incelenmiş maliyet ve uygulama kolaylığı açısından bu çalışmada kullanılacak benzetim yazılımı olarak X-Plane seçilmiştir. X-Plane'i diğer simülatörlerden ayıran en önemli özelliği Amerika Ulusal Havacılık Dairesi FAA tarafından sertifikeli olmasıdır. Ayrıca BET (Blade Element Theory) tabanlı modeli kullanarak, uçuş dinamiklerinin daha gerçekçi olmasına imkân sağlamaktadır. X-Plane, BET yöntemi ile hava aracının üzerindeki tüm

kuvvetleri hesaplayarak uçuşun nasıl gerçekleşeceğini tahmin etmektedir. Ardından hesaplanan kuvvetler ile ivme, hız, konum bilgileri elde edilmektedir. X-Plane bu hesaplamaları saniyede birçok defa yapmaktadır. Şekil 2.4’de bir hava aracına etki eden kuvvetler görülmektedir [55].



Şekil 2.4. Hava Aracını Etkileyen Kuvvetlerin Gösterimi

X-Plane benzetim yazılımında askeri ve sivil amaçlı kullanılan hazır insanlı ve insansız hava aracı modelleri Çizelge 2.3’de gösterilmektedir. Ayrıca özgün modeller de tasarlanabilmekte böylece tasarlanan hava aracının performansı test ve analiz edilebilmektedir. Şekil 2.5’de X-Plane hava aracı tasarım modülü gösterilmektedir. NASA, Boing, Cessna, Piper, Scaled Composites, Carter Aviation ve National Test Pilot okulu gibi birçok firma çalışmalarında X-Plane kullanılmaktadırlar [55].



Şekil 2.5. X-Plane Hava Aracı Tasarım Modülü [58]

Çizelge 2.3. X-Plane Benzetim Yazılımında Dahil Olan Hava Araçları [55]

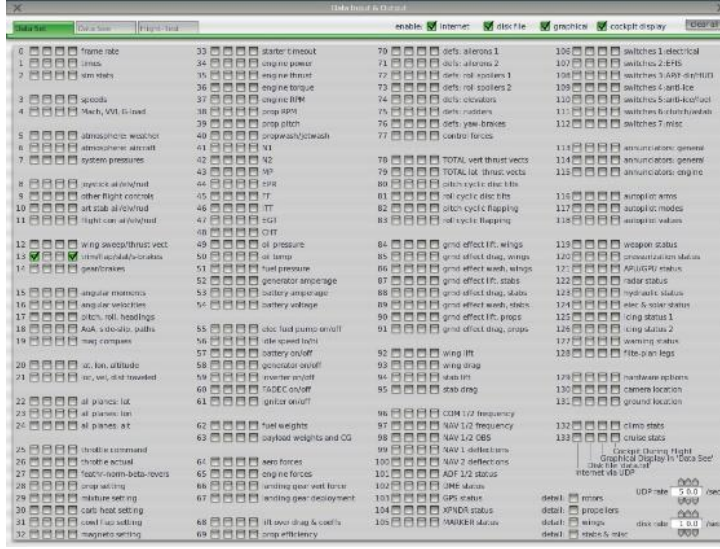
Cirrus Vision SF50	ASK-21 glider	Lockheed C-130 Hercules
Beechcraft Baron 58	Beechcraft King Air C90B	Great Planes PT-60 RC plane
Cessna 172SP	F-22 Raptor	Bombardier Canadair CL-415
Piaggio P.180 Avanti	Lockheed SR-71 Blackbird	Boeing 727/737/747/787
Stinson L-5 Sentinel	Boeing AV-8B Harrier II	Airbus A320/A340/A380
North American X-15	Boeing 747-400 ve 747-100	Viggen JA37
Columbia 400	Robinson R22 Beta Helicopter	F-4 Phantom II
McDonnell Douglas KC-10 Extender	Boeing B-52G Stratofortress	Space Shuttle Orbiter

X-Plane, hava aracı tasarımı ve performansının değerlendirilmesi, kullanılacak eklentilerle hava sahası tasarımı ve uygulanması vb. gibi birçok amaç için kullanılmaktadır. X-Plane uçuş parametrelerini (hava aracı hızı, mach sayısı, açısız hız, uçuş açıları, hava aracının koordinat bilgisi vb.) ağ üzerinden veri setleri halinde UDP ile göndermektedir.

2.3.3. UDP

X-Plane uçuş benzetim yazılımının diğere önemli bir özelliğı ise harici yazılımlar kullanarak veri alma ve veri gönderme işlemlerine olanak sağlamasıdır. X-Plane ile veri trafiğinin kurulmasında UDP protokolü kullanılmaktadır. UDP (User Datagram Protocol) veri paketi iletim garantisi olmayan fakat diğere protokollere göre daha hızlı veri trafiğı gerçekleştirilen bir protokoldür [59].

X-Plane, IEEE 754 tek duyarlıklıklı kayan nokta formatında her biri 41 bayt olan 133 veri seti içermektedir [55]. X-Plane veri setlerinin okunması ve güncellenmesinde özel eklentiler ve yazılımlar kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da veri setleri seçim ekranı ve Şekil 2.7'de seçilen veri setlerinin benzetim yazılımı üzerindeki görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2.6. X-Plane Veri Setleri Seçim Ekranı



Şekil 2.7. X-Plane Veri Setlerinin Gösterimi

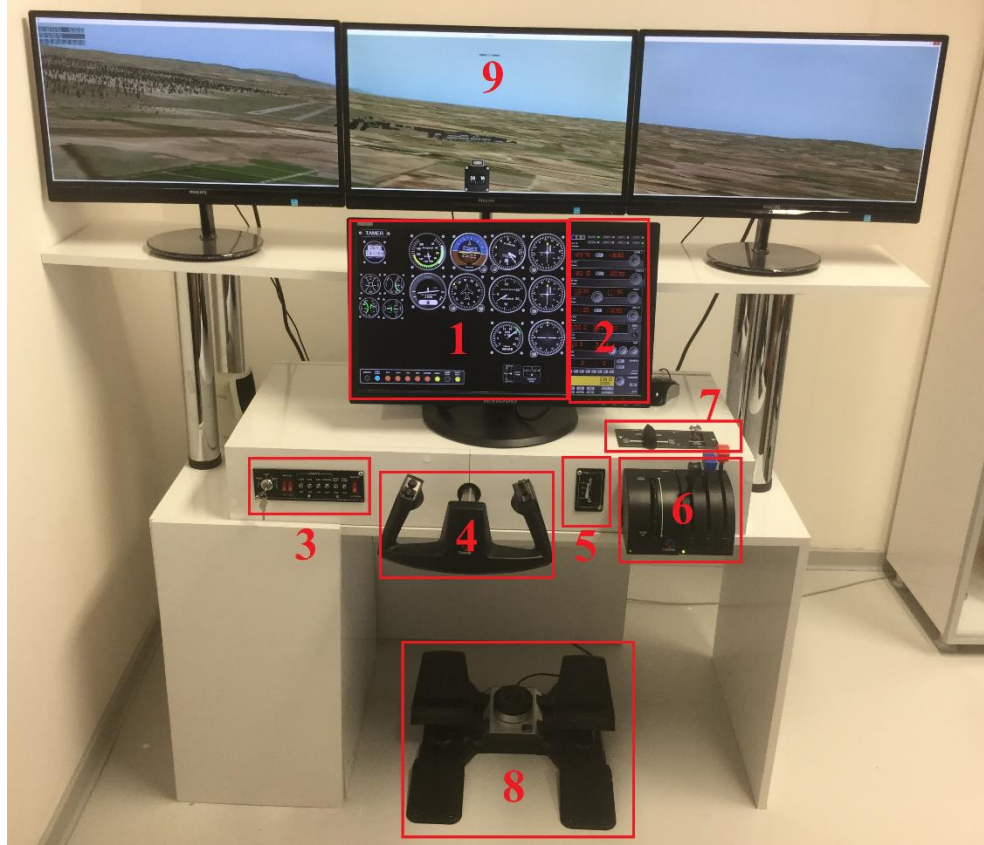
Şekil 2.8’de örnek bir UDP veri paketi yapısı gösterilmektedir. Veri setleri 5 baytlık “header” kısmıyla başlar ve paketin veri olduğunu işaret eder. Sonraki 4 bayt paketin hangi veri seti olduğunu göstermektedir. Burada sadece ilk bayt kullanılmaktadır. Sonraki 32 bayt ise seçilen veri seti içindeki 8 farklı bilgiyi içermektedir. Bir veri iletdikten sonra “header” kısmı gönderilmeksizin paket akışı devam etmektedir.

Header					Veri Seti Sırası				32 Bayt (8 Veri Seti)								
68	65	84	65	60	13	0	0	0	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
"D"	"A"	"T"	"A"	"0"													

Şekil 2.8. UDP Veri Paketi Yapısı

2.3.4. Donanım Bileşenleri

UTES'in donanım bileşenleri, ilk defa 1955 yılında üretilen, tarihte en başarılı ve dünyada en popüler eğitim uçaklarından biri olan Cessna 172 uçak tipine uygun olarak seçilmiştir. Bileşenlerin oluşturulmasında maliyet ve zaman kazancı açısından RAHAT ürünler tercih edilmiştir. Bu bileşenlerin X-Plane ile en iyi performansı almak için yazılımsal eklentiler geliştirilmiştir.



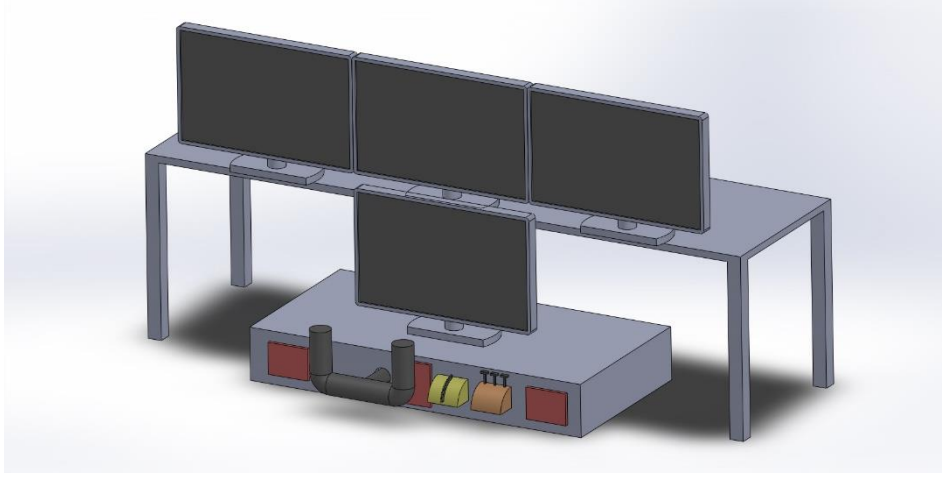
Şekil 2.9. UTES Donanım Bileşenleri

UTES; kokpit paneli, radyo paneli, anahtar paneli ve diğer ekipmanlardan oluşmaktadır. Kokpit ve radyo paneli, geliştirilen yazılım ile modüler yapıda ve istenilen hava aracına uygun olarak değişebilme özelliğine sahiptir. Anahtar panelinde hava aracının aydınlatma anahtarları, manyeto ve starter anahtarı, flap ve yakıt selektör anahtarları mevcuttur. Bu panellere ek olarak levye, pedal ve trim kumandaları vardır. Çalışma kapsamında donanımsal bileşenler Şekil 2.9'deki gibi sisteme entegre edilmiştir. Çizelge 2.4'de ise entegrasyonu yapılan donanım bileşenleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.4. UTES Donanım Bileşenlerinin Açıklaması

Konum Numarası	Açıklama
1	Kokpit Gösterge Paneli
2	Radyo Paneli
3	Elektrikli Anahtar
4	Levyeye
5	Flap Kontrol Anahtarı
6	Throttle Quadrant ve Fletner Trim
7	Yakıt Selektör Anahtarı
8	Pedal
9	Dış Görsel (X-Plane)

Geliştirilen UTES sisteminin nihai entegrasyonunun yapılmadan önce üç boyutlu çizimleri yapılmıştır. Anadolu Üniversitesi Pilotaj Bölümü öğretmen pilotlar tarafından yapılan test ve geri bildirimler doğrultusunda UTES uçuş simülöründe iyileştirmeler yapıldıktan sonra nihai entegrasyon işlemleri yapılmıştır. Şekil 2.10'da UTES'in örnek üç boyutlu görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2.10. UTES'in Üç Boyutlu Görüntüsü

3. UTES KULLANILARAK GELİŞTİRME VE TEST ORTAMI OLUŞTURULMASI

3.1. Giriş

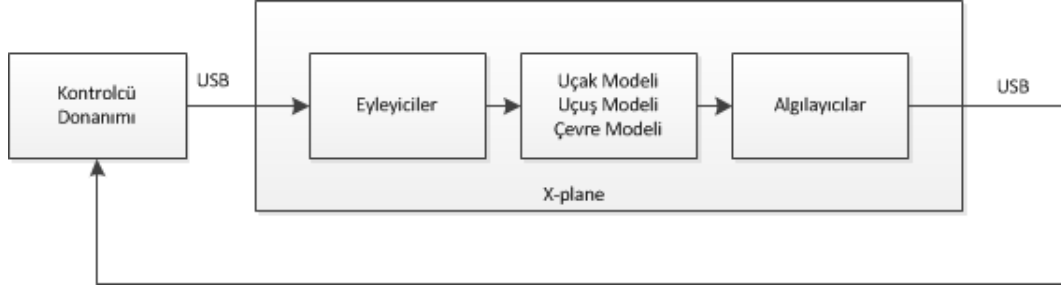
Günümüzde İnsansız Hava Araçları (İHA) sistemleri gözetleme, izleme ve keşif, hedef arama ve kurtarma, veri iletimi ve kıymetlendirme, otonom uçuş, arazi haritalama ve orman yangını tespiti gibi askeri ve sivil amaçlı olarak kullanılmaktadırlar. Bu sistemlerin sivil amaçlı kullanımının daha da yaygınlaşacağı, öneminin ve kullanım alanının artacağı öngörülmektedir [60]. İHA sistemlerinin en önemli ve maliyeti yüksek ekipmanı otopilot sistemleridir. RAHAT bir otopilot sisteminin gerçek platforma uygulanmadan önce geliştirilmesi ve testi için Döngüde Donanımsal Benzetim (DDB) ve Döngüde Yazılımsal Benzetim (DYB) kullanılan tekniklerdir.

Çalışmanın bu kısmında ilk olarak DDB açıklanıp ardından örnek bir uygulama ile sistemin yapısı, sistemim oluşturan yazılım ve donanım bilgileri verilecektir. İkinci kısımda ise DYB tanımlandıktan sonra bir uygulama ile sistemin yapısı, sistemim oluşturan yazılım ve donanım bilgileri verilecektir.

3.2. Döngüde Donanımsal Benzetim (DDB)

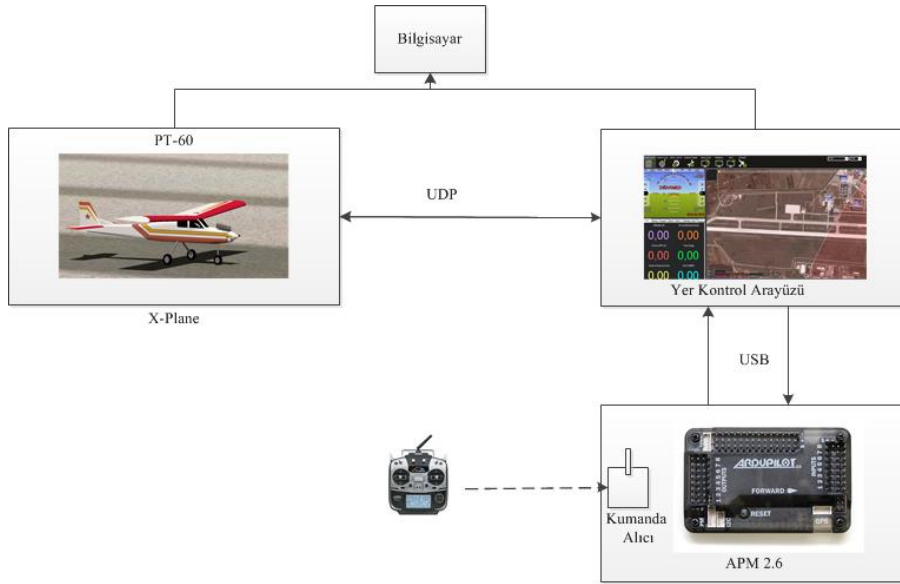
Döngüde Donanımsal Benzetim (DDB) karmaşık gerçek zamanlı gömülü sistemlerin geliştirilmesi ve test edilmesi için kullanılan bir tekniktir. DDB ilk kullanımı bir uçuş benzetimi olan “Link Eğiticisinde” kullanılmıştır. Günümüzde ise füze sistemlerinden yüksek manevra kabiliyetli uçaklara, uydu ve uzay sistemlerinden robotik uygulamalara birçok farklı sektörde bu teknik kullanılmaktadır. DDB tekniği maliyet, emniyet ve zaman gibi birçok alanda araştırmacılara büyük avantaj sağlamaktadır [61, 62]. DDB tekniği kullanılarak sistemlerin aşırı tehlikeli koşullar altında uygulama ve testi birçok kez yapılabilmektedir.

DDB gerçek donanımların, gerçek zamanlı benzetim döngüsüne dâhil edilmesidir. Bu çalışmada RAHAT bir İHA otopilot sisteminin geliştirme ve testinin yapılabileceği bir platform oluşturulmuştur. Otopilot sisteminin benzetim döngüsüne, kontrolcü donanımı dâhil edilerek DDB tekniği kullanılmıştır.



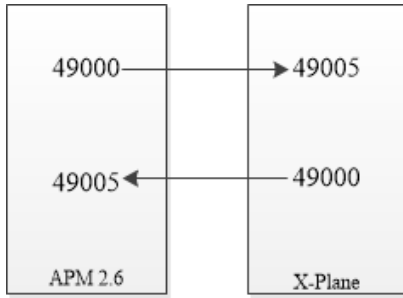
Şekil 3.1. Döngüde Donanımsal Benzetim Döngü Yapısı

Şekil 3.1’de bu çalışmada uygulanan DDB döngü yapısı gösterilmektedir. Görüldüğü gibi kontrolcü donanım sisteminin çıkışı, benzeticinin girişidir ve benzeticinin çıkışı ise kontrolcünün giriş değişkenidir. Burada gerçek zamanlı bir benzetim uygulandığından giriş/çıkış zaman değerleri aynı olmalıdır. Çalışmada kullanılan hava aracı olarak sabit kanatlı ve radyo kontrollü PT-60 modeli seçilmiştir. Şekil 3.2’de DDB benzetim döngüsünün uygulama algoritması gösterilmektedir. DDB döngüsünün donanımsal bileşenleri bir kontrolcü donanımı, benzetim yazılımı ve yer kontrol arayüzünün koşturulduğu bir bilgisayar, radyo kontrollü kumanda ve kumanda alıcısından meydana gelmektedir.



Şekil 3.2. Geliştirme ve Test Amaçlı DDB Uygulama Algoritması

Kontrolcü donanımı olarak, Arduino tabanlı RAHAT bir geliştirme kartı olan Ardupilot Mega 2.6 (APM 2.6) kullanılmaktadır. Bu kart açık kaynaklı ve düşük maliyetli olması, ayrıca DYB ile özgün otopilot sistemi oluşturulması imkân vermesinden dolayı seçilmiştir. Üzerinde ATmega 2560 işlemci bulunan APM 2.6 üzerinde GPS, telemetri, kumanda alıcı ve eyleyiciler için giriş ve çıkış portları bulunmaktadır. Bu kart için geliştirilmiş yer kontrol arayüzü (Mission Planner), kontrolcü ile benzetim yazılım arasındaki bağlantıyı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Yer kontrol arayüzü ile benzetim yazılımı UDP ile haberleşmektedir. Şekil 3.3’de APM 2.6 ile X-Plane UDP port kurulum yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.3. APM 2.6 ve X-Plane UDP Port Kurulum Yapısı

Çalışma kapsamında RAHAT bir otopilot sisteminin test ve geliştirme platformu Şekil 3.4’deki gibi kurulmuştur. Doğru DDB yapılması için kullanılan hava aracına göre benzetim yazılımının ilgili veri setleri seçilmelidir. Benzetim yazılımı olarak ikinci bölümde de anlatıldığı gibi X-Plane seçilmiştir. X-Plane uçak modeli, uçuş modeli ve çevre modelinin benzetimini yaparak kontrolcünün gerçek zamanlı benzetim için ihtiyacı olan verileri sağlamaktadır. Yer kontrol istasyonu ve benzetim yazılımı aynı bilgisayar üzerinde çalışmaktadır. Hava aracının manuel kontrol ve diğer modlar arasındaki geçişin sağlanması amacıyla radyo kontrollü kumanda kullanılmaktadır.



Şekil 3.4. Otopilot Test ve Geliştirme Ortamı

Geliştirilen bu sistem ile hava aracının üç eksende en uygun hareketini sağlayacak PID katsayılar belirlenmiştir. Ayrıca farklı meteorolojik durumların ve istenmeyen koşullar oluşturulmasıyla hava aracının beklenmedik durumlardaki tepkisi ölçülmeye çalışılmıştır. Diğer taraftan bu sistem ile hava aracının herhangi bir görev için izleyeceği yol noktaları sisteme yüklenip değişik koşullar altında defalarca tekrarlanabilmektedir. Çalışma kapsamında, yer kontrol istasyonunda Anadolu Üniversitesi hava alanı çevresinde belirlenen yol noktaları otopilot kontrolcüsüne yüklenip uçuş testleri UTES ortamında yapılmıştır. Şekil 3.5’de Google Earth programı kullanılarak hava aracının rotası gösterilmektedir.

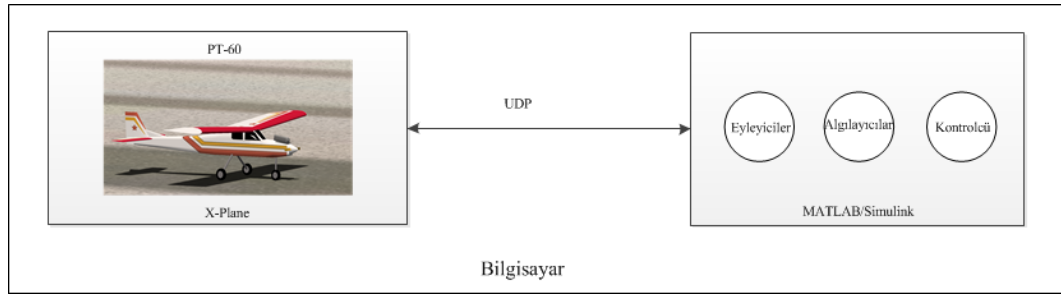


Şekil 3.5. Hava Aracı Rotasının Google Earth Programı Görüntüsü

3.3. Döngüde Yazılımsal Benzetim

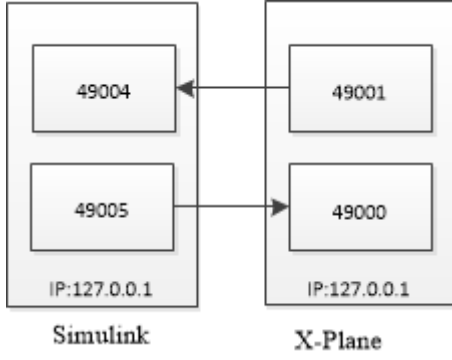
Karmaşık gerçek zamanlı gömülü sistemlerin geliştirilmesi ve test edilmesi için kullanılan diğer bir gerçek zamanlı benzetim tekniği ise Döngüde Yazılımsal Benzetim (DYB)'dir. DYB bir sistemin kontrol ve algoritmalarının geliştirilmesinde etkili bir tekniktir. DYB tekniği uygulanan sistemin hızlı geliştirilmesine olanak kılmaktadır. Geliştirme süreci bilgisayar ortamında olduğundan emniyeti yüksek bir ortamdır. DYB, zaman tasarrufu sağlamanın ve emniyetli olmasının yanında sistemlerin geliştirme ve üretim maliyetlerini de düşüren bir tekniktir.

DDB'den farkı, DDB'de kontrolcü donanımı benzetim döngüsüne dâhil edilirken, DYB'de kontrolcü donanımının da benzetimi yapılmaktadır. Yani tüm geliştirme süreçleri emniyeti yüksek, tekrarlanabilir sanal bir ortamda gerçekleşmektedir. Bu kısımda uygulanan örnek DYB döngü yapısı Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Geliştirme ve Test Amaçlı DYB Uygulama Algoritması

DYB döngü yapısında iki benzetim yazılımı mevcuttur. Bunlar hava aracı modeli, uçuş modeli ve uçak modelinin benzetiminin yapıldığı X-Plane; eyleyiciler, algılayıcılar ve kontrolcünün benzetiminin yapıldığı MATLAB/Simulink yazılımlarıdır. Bu iki benzetim yazılımı yüksek performanslı bir bilgisayar üzerinde çalışmakta ve UDP ile haberleşmektedirler. Bu iki yazılımın veri trafiğinin gerçekleşmesi için oluşturulan port kurulum yapısı Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



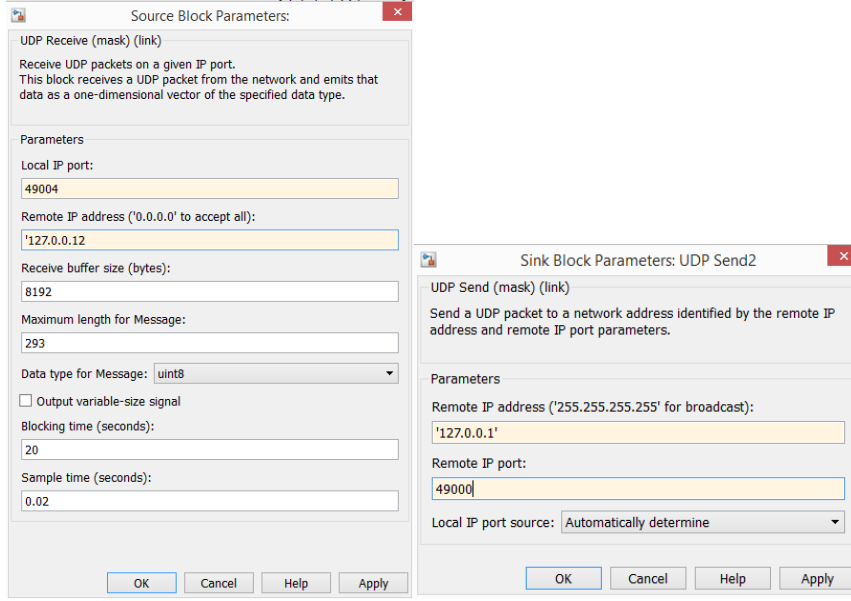
Şekil 3.7. UDP Port Kurulum Yapısı

Matlab/Simulink, veri setlerinin okunması ve güncellenmesi için hazır blok setleri içermektedir. Çalışmada X-Plane ile Matlab/Simulink arasında veri transferinde UDP alıcı ve gönderici blokları kullanılmıştır. Şekil 3.8’de Matlab/Simulink UDP veri gönderim bloğu ve veri alıcı bloğu gösterilmektedir. Bu çalışma kapsamında Cessna 172 hava aracının durum kontrolü DYB tekniğinden faydalanarak sistemin test edilme ve algoritma geliştirme amaçlı kullanımı UTES üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Matlab/Simulink UDP Veri Gönderme ve Veri Alma Bloğu

Matlab/Simulink UDP veri gönderme ve veri alma bloklarının X-Plane ile uygun port ve IP adresi kurulumu yapılmalıdır. Şekil 3.9’da aynı bilgisayar üzerinde koşturulan Matlab/Simulink ile X-Plane benzetim yazılımlarının, port ve IP adresi kurulum blokları gösterilmektedir.

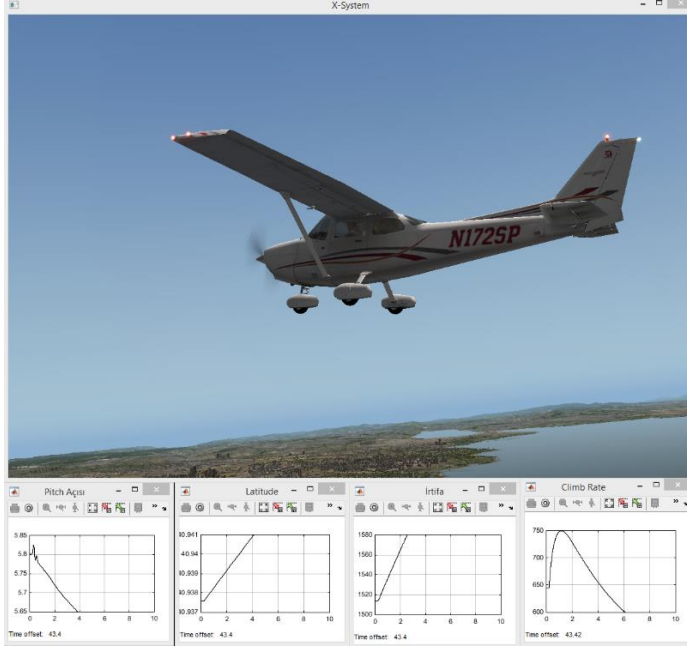


Şekil 3.9. Matlab/Simulink ile X-Plane Port ve IP Adresi Kurulumu



Şekil 3.10. Matlab/Simulink ve X-Plane Test/Geliştirme Platformu

Simulink ve X-Plane sisteminin test/geliştirme amaçlı oluşturulan platform Şekil 3.10'daki gibi kurulmuştur. Şekil 3.11'de ise DYB tekniği ile kurulumu yapılan hava aracının veri analizi ekranı gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Veri Analizi Ekran Görüntüsü

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında eğitim ve test amaçlı sabit kanatlı bir hava aracının kokpit benzetimi yapılmıştır. Uçuş Test ve Eğitim Simülatörü (UTES) adıyla oluşturulan bu uçuş simülatörünün, yazılım ve donanım bileşenleri rafta hazır ticari ürünler tercih edilerek entegre işlemleri yapılmıştır. Ayrıca geliştirilen bu sistemin kontrol ve geliştirme amaçlı kullanımı gerçek zamanlı benzetim teknikleri ile uygulanmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında uçuş simülatörlerinin geçmişten günümüze tarihçesi ve temel kilometre taşları özetlenmiştir. Uçuş Simülatörlerinin geliştirilmesi ve uygulanmasında gerekli kavramlar; sanal ortam, benzetim sadakati, eğitim transferi ve simülatör hastalığı hakkındaki araştırmalar ve bulgular özetlenmiştir. Ayrıca uçuş simülatörlerinin uluslararası otoritelerce düzenlenmiş dokümanlara göre çeşitleri ve sadakat kriterleri verilmiş ve tablolarla özetlenmiştir. İkinci aşamada insanlı ve insansız hava araçları için geliştirilen sanal ortam UTES'in, yazılım ve donanım bileşen bilgileri verilmiştir. Son olarak geliştirilen UTES ile DDB ve DDY tekniklerini kullanarak donanım ve algoritma test/geliştirme ortamı kurulum yapılmış ve örneklerle uygulaması yapılmıştır.

Uçuş simülatörlerinin eğitimi pozitif yönde etkilediği ve ayrılmaz bir parçası olduğu bilinmektedir. Bu amaçla ilerleyen çalışmalarda analog tabanlı kokpit ortamı gerçekleştirilmesi ve sadakati yüksek uçuş simülatörlerinin oluşturulması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ö. Mıdık ve M. Kartal, Simülasyona Dayalı Tıp Eğitimi, *Marmara Medical Journal*, pp. 389-399, 2010.
- [2] S. Görüş, N. Bilgi ve S. K. Bayındır, Hemşirelik Eğitiminde Simülasyon Kullanımı, *Düzce Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, pp. 25-29, 2014.
- [3] K. J. Klassen ve K. A. Willoughby, In-Class Simulation Games: Assessing Student Learning, *Journal of Information Technology Education*, 2003.
- [4] M. E. Gredler, Games And Simulations And Their Relationships To Learning, *Handbook of Research on Educational Communications and Technology*, 2004, pp. 571-581.
- [5] F. Splendor, N. A. Martins, M. S. Gimenes ve J. A. Martini, Design of an Autopilot for Cessna 182, *IEEE Latin America Transactions*, 2015.
- [6] H. Korkmaz, O. B. Ertin, Ö. Elbir, Ü. Kaynak ve Ç. Kasnakoğlu, İnsansız Hava Araçları için Donanımlı Döngü Tabanlı Otomatik Pilot Yaklaşımları Geliştirilmesi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK 2012)*, Niğde, 2012.
- [7] R. Arnaldo, L. Perez, J. Crespo ve F. Alonso, The use of virtual flight simulation for, *IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, Amman, Jordan, 2011.
- [8] Z. Shutao, H. Jingfeng, H. Qitao ve H. Junwei, A Low-Cost PC-Based Flight Simulator Development, *Systems and Control in Aerospace and Astronautics ISSCAA*, 2008.
- [9] Ntl World, <http://homepage.ntlworld.com/bleep/SimHist1.html>.
[Erişim: 30.06.2015].
- [10] K. Moore, Simulation Information, <https://www.simulationinformation.com/education/early-history-flight-simulation>. [Erişim: 20.06.2015].
- [11] R. M. House, Flight Simulator Transfer of Training Study, Master of Aviation at Massey University, Yeni Zelenda, 2003.
- [12] R. L. Page, Brief History of Flight Simulation, *In Proceedings of SimTect 2000*, pp. 1-11, 2000.

- [13] D. J. Allerton, The impact of flight simulation in aerospace, *The Aeronautical Journal*, cilt 114, no. 1162, pp. 1-8, 2010.
- [14] Wikipedia, Flight Simulator, https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_simulator#/media/File:Link-trainer-ts.jpg. [Erişim: 15.07.2015].
- [15] M. Dağlı, Helikopter Pilot Eğitimi Başlangıç Safhasında Simülatör, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [16] Airline Pilots Fly Anywhere in World-Without Leaving The Ground, *Popüler Mechanics*, p. 87, 9 1954.
- [17] B. K. Wiederhold ve S. Bounhard, *Advances in Virtual Reality*, Springer, 2014.
- [18] T. Savaş ve Ö. şahin Meriç, Uçuş Mürettebatı Üzerinde Sanal Ortam Etkisinin Değerlendirilmesi, *II.Ulusal Havacılık Tıbbı Kongresi (UHTK)*, İstanbul, 2015.
- [19] Alsim, <http://www.alsim.com/ALX-FNPTII-MCC-MPL-Flight-Synthetic-Training-Device.php>. [Erişim: 01.08.2015].
- [20] B. Özkalp ve Ü. Saygılı, The effectiveness of similitor usage in the paramedic education, *International Conference on New Horizons in Education (INTE)*, Paris, 2014.
- [21] Wikipedia, Simulation, <https://en.wikipedia.org/wiki/Simulation>. [Erişim: 20.06.2015].
- [22] R. L. Lammers, Simulation: The New Teaching Tool, *Annals of Emergency Medicine*, cilt 49, pp. 505-507, 2007.
- [23] M. Demirci, Donanım İçeren Simülasyon Sistemleri Ve Simülatör Tasarımı, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [24] F. Archer, A. Wyatt ve B. Fallows, Use of simulators in teaching and learning: Paramedics' evaluation of a Patient Simulator, *Journal of Emergency Primary Health Care (JEPHC)*, cilt 5, pp. 1-16, 2012.
- [25] ICAO, Manual of Criteria for the Qualification of Flight Simulation Training Devices (ICAO 9625), 3 dü., cilt 1, Kanada, 2009.
- [26] Wikipedia, Eğitim, <https://tr.wikipedia.org/wiki/E%C4%9Fitim>. [Erişim: 15.07.2015].

- [27] E. W. Cheng ve L. Hampson, Transfer of training: A review and new Insights, *International Journal of Management Reviews*, cilt 10, pp. 327-341, 2009.
- [28] Wikipedia, Transfer of Training, https://en.wikipedia.org/wiki/Transfer_of_training. [Erişim: 10.06.2015].
- [29] N. D. Macchiarella, T. Brady ve P. K. Arban, High Fidelity Flight Training Devices In The Training Of Ab Initio Flight Students, *Digital Avionics Systems Conference DASC*, 2005.
- [30] E. L. Martin, Training Effectiveness of Platform Motion, Defense Technical Information Center, 2005.
- [31] J. E. Stewart, II ve J. A. Dohme, U.S. Army Initial Entry Rotary Wing Transfer of Training Research, *The International Journal of Aviation Psychology*, cilt 12, pp. 359-375, 2002.
- [32] N. D. Macchiarella, P. K. Arban ve S. M. Doherty, Transfer of Training from Flight Training Devices to Flight for Ab-Initio Pilots, *International Journal of Applied Aviation Studies*, cilt 6, pp. 299-314, 2006.
- [33] SHGM, Uçak Pilotu Lisans Yönetmeliği (SHY-1), Ankara, 2006.
- [34] Wikipedia, Flight Simulator, https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_simulator. [Erişim: 20.08.2015].
- [35] EASA, Certification Specifications for Aeroplane Flight Simulation Training Devices CS-FSTD (A), 2012.
- [36] Part FCL Commission Regulation (Eu) No 1178/2011, Official Journal of the European Union, 2011.
- [37] Wikipedia, Full Flight Simulator, https://en.wikipedia.org/wiki/Full_flight_simulator. [Erişim: 20.07.2015].
- [38] Boeing, Boeing Forecasts, [http://www.boeing.co.uk/news-mediroom/news-releases/2015/june/boeing-forecasts-demand-for-38050-new-airplanes-valued-at-\\$5.6-trillion.page](http://www.boeing.co.uk/news-mediroom/news-releases/2015/june/boeing-forecasts-demand-for-38050-new-airplanes-valued-at-$5.6-trillion.page). [Erişim: 22.08.2015].
- [39] Halldale, Cat 4/2012, http://halldale.com/magazines/cat/issues/cat-42012#.Vea1_PntlBc. [Erişim: 12.07.2015].
- [40] Halldale, Cat 4/2015, http://halldale.com/magazines/cat/issues/cat-42015#.Vea1r_ntlBc. [Erişim: 10.07.2015].
- [41] Boeing, 787 Training for Pilots and Mechanics, http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_1_08/article_02_3.html. [Erişim: 15.07.2015].

- [42] FNPT II, <http://www.aerosimulators.com/en/configurations-flighttraining/fnpt-ii-flighttraining.html>. [Erişim: 12.07.2015].
- [43] Frasca, Fixed Wing AATD/BITD, <http://www.frasca.com/index.php/fixed-wing/fw-aatd>. [Erişim: 12.07.2015].
- [44] NTSA, Why Use Simulation? Return on Investment, http://www.trainingsystems.org/publications/simulation/roi_effici.cfm. [Erişim: 15.07.2015].
- [45] J. G. Casali, Vehicular Simulation Induced Sickness, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1986.
- [46] J. S. Hicks ve D. B. Durbin, A Summary of Simulator Sickness Ratings for U.S. Army Aviation Engineering Simulators, Army Research Laboratory, 2011.
- [47] K. S. Hale ve K. M. Stanney, Handbook Of Virtual Environments, 2.Baskı, 2015.
- [48] A. Yılmaz, D. Yılmaz, A. M. şenyiğit, K. B. Grr ve V. İşler, Genel Amaçlı Araştırma Simülatörü: Donanım ve Yazılım Altyapısının Tasarlanması ve Geliştirilmesi, *Savunma Bilimleri Dergisi*, cilt 11, no. 1, pp. 147-161, 2012.
- [49] C. Noble, The Relationship Between Fdelity and Learning In Aviation Training and Assessment, *Journal of Air Transportation*, cilt 7, no. 3, pp. 33-54, 2002.
- [50] Flight Simulator X, <https://fsxinsider.com/>. [Erişim: 20.07.2015].
- [51] X-Plane, <http://www.x-plane.com/>. [Erişim: 20.07.2015].
- [52] Flight Gear, <http://www.flightgear.org/>. [Erişim: 20.07.2015].
- [53] B. Loguidice ve M. Barton, Flight Simulator (1980): Digital Reality, *Vintage Games*, 2009, pp. 93-104.
- [54] Flight Simulator History, <http://fshistory.simflight.com/fsh/versions.htm>. [Erişim: 20.07.2015].
- [55] X-Plane, <http://wiki.x-plane.com/>. [Erişim: 25.07.2015].
- [56] J. Craighead, R. Murphy, J. Burke ve B. Goldiez, A Survey of Commercial & Open Source Unmanned Vehicle Simulators, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, İtalya, 2007.

- [57] H. Figueiredo, A. Bittar ve O. Saotome, Platform for Quadrirotors: Analysis and applications, *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Orlando,FL,USA, 2014.
- [58] X-Plane, http://wiki.x-plane.com/The_Plane_Maker_Interface. [Erişim: 20.08.2015].
- [59] F. Ono, K. Takizawa, H. Tsuji, L. Shan, T. Kagan ve R. Miura, Measurement of TCP and UDP performance over UAS relay networks, *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Orlando, 2014.
- [60] T. Savaş ve T. Filik, «Anadolu Üniversitesi'nde Otonom Arama Ve Kurtarma Amaçlı Deneysel İha Sistemi Geliştirme Çalışmaları, VIII. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı (UHUM), Eskişehir, 2015.
- [61] E. Duman ve E. Akın, EEBM Eğitiminde Döngüde Donanımsal Benzetim Tekniğinin Kullanımı, II. *Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendislikleri Eğitimi Sempozyumu*, Ankara, 2005.
- [62] R. Isermann, J. Schaffnit ve S. Sinsel, Hardware-in-the-loop Simulation for the Design and Testing of Engine-Control Systems, *Control Engineering Practice*, cilt 7, no. 5, pp. 643-653, 1999.