

Uçuş Mekanikliği Hesaplamalarında MATLAB/Simulink Kullanımı: İstanbul'dan Kahire'ye Uçuş Planlaması Örneği

Abdurrahim Bilal ÖZCAN^{1,*}  Berkay KAVAL¹ 

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri, Uçak Mühendisliği, İstanbul, Türkiye
[*ozcana20@itu.edu.tr](mailto:ozcana20@itu.edu.tr) (Corresponding Author/Sorumlu Yazar)

Makale Bilgileri	ÖZ
Makale Geçmişi Geliş: Kabul: Yayın: Anahtar Kelimeler:	<p>Benzetim araçları gerçek bir sistemin üretimi ve/veya yönetimi öncesinde büyük maliyetleri önlemek, hızlı prototipleme ile AR-GE çalışması gerçekleştirmek, farklı senaryolarda sınırsız test imkanı sağlamak gibi bir çok avantajı kullanıcılarına sunmaktadır. Bu çalışmada MATLAB/Simulink benzetim ortamı kullanılarak uçuş mekaniği kapsamında, İstanbul'dan Kahire'ye bir uçuşun planlaması yapılmıştır. Uçuş planına dair hesaplamalardan önce Euler'in diferansiyel denklem çözücü metodundan (ode1) ve benzetim aracındaki kullanımından bahsedilmiştir. Ardından uçağın değişkenlerinden (X ve Y eksenlerindeki yatay konum, irtifa, gerçek hava hızı, baş açısı, uçağın kütlesi), kontrol işaretlerinden (motor itkisi, yalpa açısı, uçuş yolu açısı), hava trafiği kurallarından ve gerçek bir uçağın rotasından bahsedilerek benzetim aracının kullanım kapsamı ortaya konmuştur. Çalışmanın kapsamı belirtildikten sonra İstanbul Havalimanından (IST) Kahire Havalimanına (CAI) gerçek bir Boeing 737-700 uçağının uçak performansı operasyonel verileri kullanılarak uçuş rotası ve bu rotadaki kalkış, tırmanma, seyir uçuşu, dönme, iniş gibi hareket değişimleri belirtilmiştir. Tüm uçuşun benzetimi aşamasında Eurocontrol Experimental Centre'in BADA (Base of Aircraft Data) projesi kapsamında yayınladığı hesaplamalara dayanarak uçağın değişkenleri, 3 boyutta rotası, yataydaki hızı, yakıt tüketimi, uçağın rotasının değişimi vb. gibi veriler görselleştirilerek yorumlanmıştır. Uçağın seyir uçuşunda hızın 240 m/s civarında, itkinin 30 kN civarında, yakıt tüketiminin gerçekteki uçağın yakıt kapasitesine uygun olarak ve genel C_L/C_D oranının literatüre uygun elde edilmesi benzetim ortamının gerçek testler öncesi modellemede uygun olduğunu ortaya koymuştur. Son kısımda ise elde edilen sonuçlar ile birlikte benzetim araçlarının uçuş mekaniği özelinde sağladığı faydalardan bahsedilmiştir.</p>

Using MATLAB/Simulink in Flight Mechanics Calculations: An Example of Flight Planning from Istanbul to Cairo

Article Info	ABSTRACT
Article History Received: Accepted: Published: Keywords:	<p>Simulation tools offer many advantages to their users, such as avoiding large costs before the production and/or management of a real system, performing R&D work with rapid prototyping, and providing unlimited testing in different scenarios. In this study, a flight from Istanbul to Cairo was planned within the scope of flight mechanics using the MATLAB/Simulink simulation environment. Before the calculations of the flight plan, Euler's differential equation solver method (ode1) and its use in the simulation tool are mentioned. Then, by talking about the variables of the aircraft (horizontal position on the X and Y axes, altitude, true airspeed, head angle, mass of the aircraft), control signals (engine thrust, yaw angle, flight path angle), air traffic rules and the route of a real aircraft, the simulation tool will be used. Scope is revealed. After specifying the scope of the study, the flight route and movement changes such as takeoff, climb, cruise flight, turn, and landing on this route are indicated by using the aircraft performance operational data of a real Boeing 737-700 aircraft from Istanbul Airport (IST) to Cairo Airport (CAI). During the simulation phase of the entire flight, the variables, 3D route, horizontal velocity, fuel consumption, change of the aircraft's route etc. data such as visualization and interpretation. In the last part, together with the results obtained, the benefits of simulation tools in flight mechanics are mentioned.</p>

Atıf/Citation:



"This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) (CC BY-NC 4.0)"

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilgi üretme hızı ve buna eşlik eden teknolojik ilerleme günümüzde yeni bir anlam kazanmıştır. Teknolojinin bu denli hızlı gelişimi farklı sektörlerde birçok inovasyona yol açmıştır. İnovasyon artışı ile birlikte amaç sadece son kullanıcıya ürün teslim etmek değil, teslim edilen ürünün ileri seviyede AR-GE çalışmalarıyla eniyelenmiş şekilde de teslim etmek olmuştur. AR-GE çalışmalarında karşılaşılan en önemli sorun, araştırmaların ve araştırılan unsurların test edilmesi sürecinin uzun sürebilmesi ile birlikte bu testlerin maliyetidir (İltaş ve Bulut, 2017). Bu sebeple, hem test maliyetini düşürdüğü için hem de daha kısa sürede daha fazla test yapılmasına olanak sağladığı için benzetim araçlarının önemi artmıştır (Karadağlı ve Çulha, 2014). Simülasyon araçları AR-GE çalışmalarının yanı sıra eğitimde de sıklıkla kullanılmaktadır. Deneylerin daha güvenli, düşük maliyetli ve hızlı yapılması (Sezer ve Orgun, 2017), proje çalışmaları için veri toplanması, bitirme tezlerinin simüle edilmesi gibi çalışmalarda kullanılabilir.

Benzetim temelli çalışmalar AR-GE çalışmalarının önemi ortaya çıkartarak araştırma süreçlerini kısaltmak ve maliyeti azaltmakla beraber daha hızlı prototipleme olanağı da sağlamaktadır. Bu çalışmada, MATLAB® ürün ailesine ait benzetim uygulamalarının kullanıldığı çeşitli sektörlerde gerçekleştirilmiş matematiksel hesaplara, fiziksel modellenmelere, kontrole ve benzeri birçok örneğe değinilerek uçuş mekaniğı çalışması kapsamında İstanbul'dan Kahireye gerçekte yapılan bir uçuşun benzetim ortamında analizi yapılmıştır. MATLAB® ürün ailesinin kullanıldığı sektörlerde ve konulara değinilecek olunursa; tıp ve fizyoterapi alanında Duman (2008), diz üstü protezlerde gerçekçi yürüyüşe benzer dinamik protezin ayarlanması için kullanılan yürüyüş hareketini modelleyen dinamik denklemlerin modellenmesi ve çözümlenmesinde MATLAB®/Simulink kontrol sistem toolbox altında yer alan Fuzzy Logic Toolbox, Control System Toolbox ve Model Linearizer uygulamasını kullanmıştır. Elektrik dağıtım sektöründe Dursun (2006), Simscape Electrical bloklarını kullanarak ve kendi bloğunu oluşturarak farklı yük aktarımları neticesinde gözlenen akım-gerilim değişimleri, kısa devre akımları ve gerilim düşümlerini analiz etmiştir. Kandemir (2006) ise çalışmasında, vinçlerde salınımları en aza indirmek için tasarlanan iki farklı kontrolcünün algoritmasını kurmada ve salınım hesaplarında kullanılacak denklemlerin hesaplarında MATLAB arayüzünden ve Control System Toolboxtan yararlanmıştır. Denizcilik sektöründe Avinal (2000), gemi üzerindeki ekipmanların çift sinüsoidal şok yüklemesine vereceği yanıtın tahmin edilmesi üzerine yaptığı çalışmada MATLAB®/Simulink kullanmıştır. Bektaş (2019), rüzgar türbin sisteminin matematiksel modelinin elde edilmesi ve rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi yöntemlerinin veriminin hesaplanmasında Control System Toolboxtan ve Motor Control Blocksetin sağladığı Clarke and Park Transforms modülünden faydalanarak kendi kütüphanesini oluşturmuştur. Aladağ (2017) Simscape Electrical'da bulunan Photovoltaic solar cell bloğunu kullanarak monokristal bir yapıda olan PV panelin matematiksel modelini oluşturmuştur ve değişken hava parametrelerine göre elektriksel performansının analizini yapmıştır. Çalışır (2015), MATLAB® /Simulink ile altı serbestlik derecesine sahip bir hava aracını modellemiştir. PID tabanlı bulanık kontroller ve doğrusal olmayan sistem üzerinden verileri Fuzzy Logic Toolbox yardımıyla işleyerek Global Optimization Toolboxta yer alan Genetic Algorithm kullanarak PID kontrolcü performansı optimize edilmiştir. Yine ortam modellemesinde Aerospace Blocksette yer alan rüzgar modeli, kontrolcü tasarımında ve analizinde Control System Toolbox ve Simulink Control Design kullanmıştır. Mekanizma analizi konusunda ise Kılınç (2010), MATLAB®/Simulink'te kendi bloklarını oluşturarak gerekli Lagrange hesaplamaları ile elastik ve rijit dört çubuklu mekanizmaların verimliliğini incelemiştir.

IHA'lara algoritma geliştirilmesi, uçuş senaryolarının simüle edilmesi, iletişim protokollerinin incelenmesi ve uçuş bilgilerinin analizi gibi konularda Simulink kütüphanesinde yer alan UAV Toolbox araştırmacılara bir çok konuda kolaylık sağlamaktadır (Mathworks, 2021). Örneğin Mathworks'un (2022) yayınladığı çalışmada UAV Toolbox'ın sağladığı UAV Package Delivery uygulaması yardımıyla küçük

bir multikopterin otonom şekilde, şehir ortamında kalkış, uçuş ve inme aşamalarından oluşan uçuşu için algoritma geliştirilerek veri analizi yapılmıştır. Yine Mathworks'un (2022) sağladığı UAV Scenario uygulaması yardımıyla üç boyutlu bir ortamda statik ağırlar, İHA platformları ve sensörlerden oluşan bir simülasyon senaryosu oluşturulmuştur. UAV Toolbox'ta bulunan Flight Log Analyzer uygulaması ise UAV kullanıcılarının ve geliştiricilerinin sistem performanslarını test etmelerine yardımcı olması için oluşturulmuştur (Mathworks, 2022). Uçuş analizlerini doğru şekilde yapabilmek için uygun koordinat sistemlerinin tanımlanmasında ve koordinat sistemleri arası dönüşümlerin yapılmasında MATLAB® aktif olarak kullanılmaktadır (Mathworks, 2022). Analiz esnasında ihtiyaç duyulan parametreler de tanımlanıp hesaplanabilmektedir (Mathworks, 2022). Yine uçuş analizlerinde çözülmesi gereken üç ve altı serbestlik dereceli denklemler de MATLAB®'in sağladığı açıklamalar takip edilerek uygun bloklar ile doğrudan simüle edilebilmektedir (Mathworks, 2022). Bahsedilen analizlerde kullanılacak olan atmosfer modelindeki sıcaklık, basınç, hava yoğunluğu vb. değişkenlerinin hesaplanmasında ise ISA Atmosphere Model bloğu kullanılabilir (Mathworks, 2022). Simulink'in bir başka kullanım örneğini olarak uçak parametrelerinin bloklar şeklinde modellenmesinden bahsedilebilir. Örneğin NASA'nın geleceğin taşımacılık ve ulaştırma problemlerine yönelik tasarladığı HL-20 personel fırlatma sisteminin kaldırıcı gövdesi ve kontrolörü HL-20 with Flight Instrumentation Blocks adıyla modellenmiştir (Mathworks, 2022). Bu modelleme sayesinde hava aracının taşıdığı obje ve fırlatacağı yörünge dikkate alınarak hangi girdilerin verilmesi gerektiği hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda bu uçuş parametreleri anlık olarak takip ederken FlightGear Preconfigured 6DoF Animation uygulaması yardımıyla tamamen görselleştirilebilmektedir (Mathworks, 2022). Savunma sanayinde sıklıkla kullanılan otonom füzelerin yönlendirme sistem algoritmalarının tasarlanmasında ve bu algoritmaların gerçek zamanlı nasıl davranış sergiledikleri MATLAB® Control System Toolbox ve Simulink® Control Design yardımıyla test edilip gözlemlenebilir (Mathworks, 2022). Uçaklarda sıklıkla kullanılan turbofan motorunun modellenmesi olan turbofan motor sistem bloğu, belirli bir gaz keleşi konumunda, mach sayısında ve belirli yükseklikte bir turbofan motorunun ve kontrolörün itme gücünü ve yakıt kütle akış hızını hesaplamaktadır (Mathworks, 2022). Havacılıkta yine çok önemli olan pilotun fiziksel davranışlarını gözlemlemek için de Tustin Pilot Model bloğu kullanılabilir (Mathworks, 2022). Ticari aviyonik sistem yazılımlarını standartlara uygun hale getirmek için yani fazla satırlar, döngü hataları, sıfıra bölünme gibi istenmeyen unsurları ortadan kaldırmak için DO Qualification Kit DO-178, DO-278, ve DO-254 standartları için kullanılabilir (Mathworks, 2022). Sadece uçaklar için değil, herhangi bir sistem için yazılan kodların sistem gereksinimlerini uygulamasını, uygulama modelleme standartlarını takip etmesini, ölü mantık, sıfıra bölme, taşma gibi tasarım hatalarının olup olmadığını, uygulamanın her zaman gereksinimleri karşıladığı Simulink Verification and Validation uygulaması kullanılarak test edilebilmektedir (Mathworks, 2017).

MATLAB® ürün ailesi hem endüstride hem akademide hem de havacılık alanında aktif şekilde kullanılmaktadır. Liu, X. ve Cao, Y., (2010) Rhapsody ve Simulink kullanarak İHA uçuş kontrol sistemi tasarlamışlardır. Sistemler arasındaki uygunluğu ise Simulink Coder aracından yararlanarak sağlamışlardır. Figueiredo ve ark. (2012) ise quadricopter tipi İHA için X-plane Plane-Maker aracı üzerinde modellemeler yaparak uçağın çeşitli uçuş koşullarında tepkisini gözlemlemişlerdir. Dataların işlenmesinde ise Instrument Control Toolbox'tan yararlanmışlardır. Ayrıca çeşitli kontrol ve gezinme algoritmalarını da denemişlerdir. Hopf ve ark. (2020) çalışmalarında öğretim ve araştırmada kullanılmak üzere Simulink StateFlow aracı kullanarak insansız hava araçlarına dayalı bir deney seti sunmuştur. Bu deney seti uçuş mekaniği ve uçuş kontrolü ile ilgili yapılabilecek iyileştirmeleri gözlemlemek için kullanılmaktadır. Yine havacılık alanında sürü İHA sistemlerindeki haberleşme karmaşıklığını basite indirgemek ve en iyi çözüm algoritmalarına ulaşmak ve algoritmaların testi için de Optimization Toolbox kullanılmaktadır (Arbaç, 2022). Otopilot tasarlamada da MATLAB® /Simulink kullanılabilir. Yücel (2020) çalışmasında MATLAB®'in kullanıcıları tarafından geliştirilen Airlib kütüphanesinden de

yararlanarak gürbüz kontrolün bir çeşidi olan kayan kipli kontrolcü kullanarak otopilot sistemi tasarlanmıştır. Ayrıca bu sistemi yedekleyerek, sisteme entegre edilen seçmen algoritması ile simülasyon ortamında performans analizleri yapmıştır. Dünder ve ark. (2020) çalışmalarında sabit kanatlı dikey kalkış ve iniş yapabilen (VTOL) insansız hava aracının (İHA) enerji tüketimini içeren tasarım adımlarını ve performans analizlerinde Simscape Electrical'da bulunan batarya modeli yardımıyla gerçekleştirerek kalkış, tırmanma, seyir ve iniş aşamalarında enerji tüketimini göstermişlerdir. Özcan ise çalışmasında (2022), F-16 Uçağının dinamik davranışı hakkında bilgi elde etmek için uçağı frekans alanında incelenmiş ve uluslararası standartlara uygun olarak uçağın yanal ve boylamsal modları dikkate alınarak uçuş kalitesi analizini MATLAB/Simulink kullanarak incelenmiştir.

YÖNTEM (METHOD)

Gerçek dünya uygulamalarında ortaya çıkan adi diferansiyel denklemlerin çoğu tam olarak çözülemez. Bir diferansiyel denklemin doğru bir yaklaşık çözümünü elde etmek için sayısal yöntemler kullanılmaktadır (Gururajan, 2022). Çalışmada kullanılan Euler'in yöntemi belirli bir başlangıç değerine sahip adi diferansiyel denklemleri (ODE'ler) çözmek için birinci dereceden bir sayısal uygulamadır. Bu yöntemi kullanmak, doğruluktan biraz ödün verir ancak hız kazanır. Yapılan uygulamanın işlem yükü göz önünde bulundurularak Euler yöntemi tercih edilmiştir (Chapra vd., 2015). Örneklem zamanı (ts) 0,01 saniye olarak kabul edilmiştir.

Uçuş mekaniği çalışması kapsamında yapılan bu çalışma hem standart kod yazımına hemde görsel programlamaya olanak sağladığı için hemde içerisindeki birçok hazır kütüphane ve toolbox bulunmasından dolayı MATLAB/Simulink programının R2022a sürümü kullanılmıştır. Ayrıca Euler'in yöntemi (ode1) ve diğer çözümler Simulink'te model ayarları kısmında hazır olarak bulunmaktadır.

Çalışmada kullanılan temel uçuş verileri flightaware.com sitesinden 14 Nisan 2022 tarihli THY690 nolu uçağın veri tabanından elde edilmiştir. Bu verilerden uçağın ne kadar sürede tırmanış, uçuş ve iniş yaptığı temel teşkil etmektedir. Uçak sensöründen okunan veriler büyük miktarlarda değişim ve titreşim içerdiği için irtifa verisi sadeleştirilerek kullanılmıştır. Uçuş süreleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

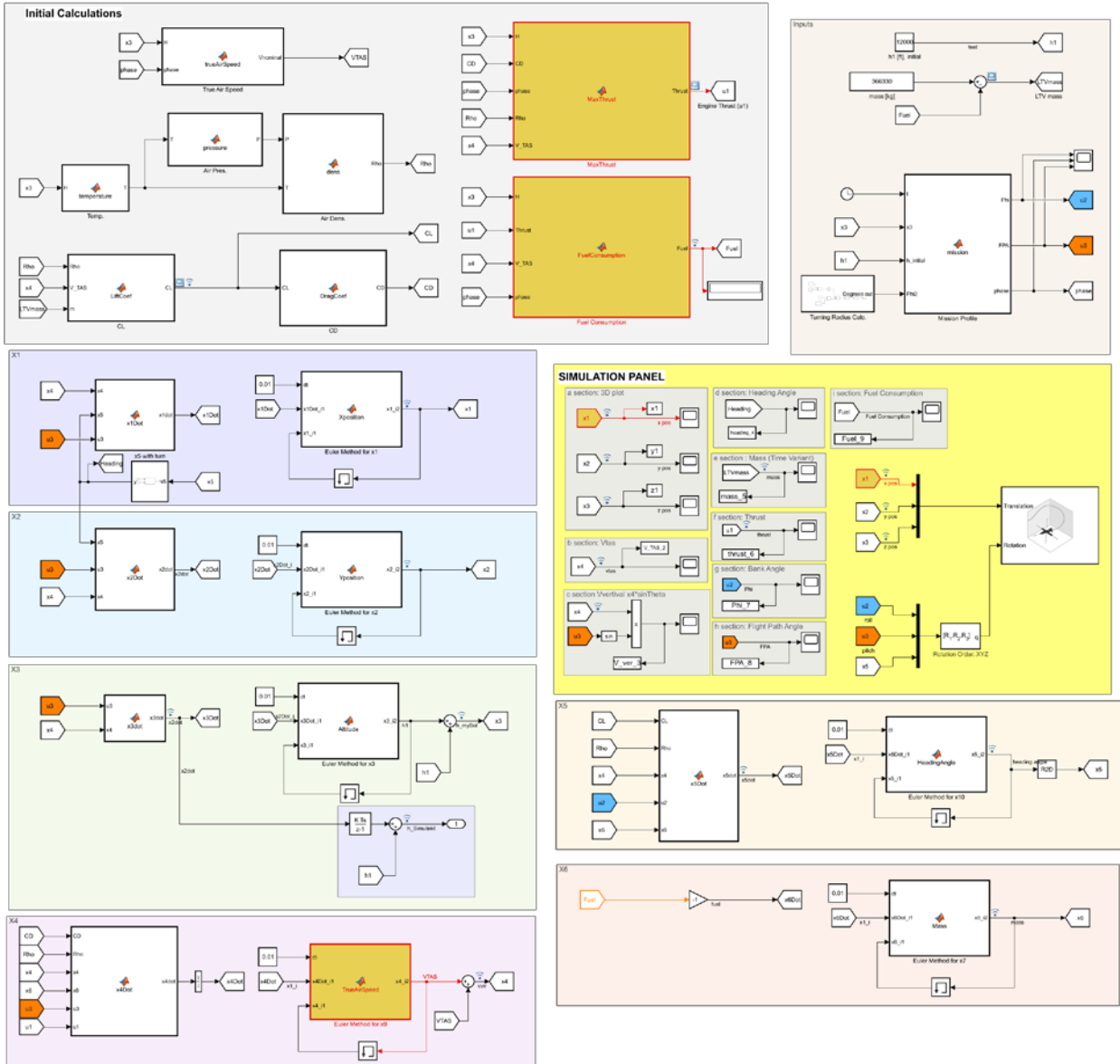
Tablo 1. Uçuş Fazlarının Saniye Cinsinden Değeri

UÇUŞ FAZLARI	SÜRE (sn)
Tırmanış	1097 sn
Uçuş	3775 sn
İniş	1270 sn
Toplam	6142 sn

Uçuş BOEING B737-700 uçağıyla yapılmaktadır. Hesaplamalar bu uçağın kütlesi, alabileceği faydalı yük miktarı, yakıt hacmi, bazı aerodinamik katsayıları gibi temel özellikler kullanılarak yapılmıştır. Tablo 2'de uçağa ait temel veriler verilmiştir.

Tablo 2. Uçağa Ait Temel Veriler

Kütle	70080 kg
Kanat Yüzey Alanı	124,65 m ²
İtke (x2)	89–116 kN
Yakıt Kapasitesi	26025 L (21000 kg)
Yolcu Kapasitesi	126-149



Şekil 1. Tüm Durumların ve Hesaplamaların Modellemesini İçeren Genel Simulink Görünümü

Bu çalışmada bir uçağın 6 durumu incelenmiştir. Uçağın durum değişkenleri, yatay konum (x_1 ve x_2), irtifa (x_3), gerçek hava hızı (x_4), baş açısı (x_5) ve uçağın kütlesidir (x_6). Uçağın kontrol girdileri motor itışı (u_1), yatış açısı (u_2) ve uçuş yolu açısıdır (EN:flight path angle, u_3). Durumları hesaplamak için öncelikle sıcaklık [K], hava basıncı [P], hava yoğunluğu [kg/m^3], Gerçek hava hızı [knot], Kaldırma katsayısı C_L ve sürtünme katsayısı C_D hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken BADA Uçak Veri Tabanının 3.11 sürümü referans olarak kullanılmıştır.

$$T = T_0 + \Delta T + \beta_{T,<} * H \quad (1)$$

Denklem (1) irtifaya bağlı sıcaklık hesaplama formülüdür. T_0 deniz seviyesindeki standart sıcaklık, ΔT sıcaklık değişimi, $\beta_{T,<}$ sıcaklık gradyanı ve H irtifadır.

$$p = p_0 * \left(\frac{T - \Delta T}{T_0} \right)^{\left(\frac{-g_0}{\beta_{T,<} * R} \right)} \quad (2)$$

Denklem (2) sıcaklığa dolayısıyla irtifaya bağlı hava basıncı formülüdür. Burada R evrensel gaz sabiti, p_0 standart hava basıncıdır.

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (3)$$

Denklem (3) hava yoğunluğunu veren formüldür.

$$C_L = \frac{2 * m * g_0}{\rho * (V_{TAS})^2 * S * \cos(\Phi)} \quad (4)$$

Denklem (4) taşıma kuvvetini hesaplamak için gerekli taşıma katsayısını veren formüldür. Bu katsayısı kütle (m) ve yer çekimi ivmesi (g) ile doğru orantılı olup hava yoğunluğu (ρ), gerçek hava hızı, kanat yüzey alanı ve yatış açısının kosinüsü ile ters orantılıdır.

$$C_D = C_{D0,CR} + C_{D2,CR} * C_L^2 \quad (5)$$

Denklem (5) sürüklenme kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan sürüklenme katsayısının formülüdür. $C_{D0,CR}$ ve $C_{D2,CR}$ seyir hali için sürüklenme sabitleridir.

$$\dot{x}_1 = x_4 \cos(x_5) \cos(u_3) \quad (6)$$

$$\dot{x}_2 = x_4 \sin(x_5) \cos(u_3) \quad (7)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \sin(u_3) \quad (8)$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{C_D S \rho x_4^2}{2x_6} - g \sin(u_3) + \frac{u_1}{x_6} \quad (9)$$

$$\dot{x}_5 = -\frac{C_L S \rho x_4}{2x_6} \sin(u_2) \quad (10)$$

$$\dot{x}_6 = -f \quad (11)$$

Bir uçak modellenirken zamanla değişmeyen doğrusal bir sistem olarak modellenir. Ancak özellikle uzun mesafeli uçuşlarda yakıt tüketimi hesaplaması performans değerlendirmesi için çok önemli bir parametredir. Yakıt tüketimi nedeniyle uçağın kütlesi sürekli azalmaktadır. x_6 durumu uçaktaki kütle değişimini gösterir. İlgili hesaplama Denklem (11)'de verilmiştir.

Temel denklemlerden sonra uçuş fazına ve performansına dayalı hesaplamalar bir sonraki bölümde verilmiştir.

Uçuş Fazları

Uçakların performansı incelenirken uçuş moduna, ortamına, bölgesine, planına ve hava sahasına göre davranışları hesaba katılmaktadır. Genel uçuş aşamaları; kalkış aşaması, tırmanma aşaması, seyir aşaması, alçalma aşaması, yaklaşma aşaması ve taksi aşaması olarak sınıflandırılmaktadır. Her uçuş aşamasının belirli uçuş modları ve uçuş gereksinimleri bulunur. Bunlardan yola çıkarak, her bir uçuş aşaması için uçuş senaryoları kurularak, uçuş amaçları, görevleri belirlenir, uçuş süreçleri organize edilir. Bu çalışmada uçuşun büyük bir bölümünü oluşturan tırmanma, seyir uçuşu ve iniş fazları için hesaplamalar yapılmıştır. Üç faz için gereken itkinin hesabı Denklem (12-14)'te verilmiştir.

$$İtki_{tırmanma} = C_{Tc,1} * (1 - \frac{H}{C_{Tc,2}} + C_{Tc,3} * H^2) \quad (12)$$

$$\dot{I}tki_{seyir} = C_{Tcr} * \dot{I}tki_{tırmanma} \quad (13)$$

$$\dot{I}tki_{iniş} = C_{Tdes} * \dot{I}tki_{tırmanma} \quad (14)$$

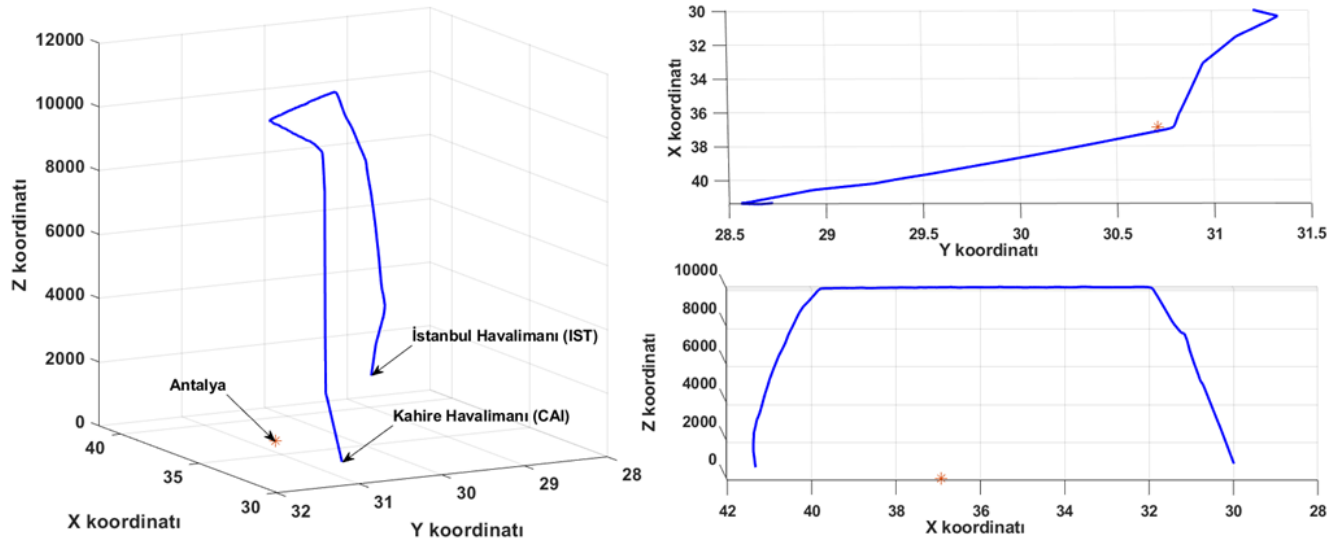
$C_{Tc,1,2,3}$ tırmanma fazı için verilen gereken itki katsayılarıdır. Seyir uçuşu için itki, tanım gereği sürüklemeye eşittir. Maksimum seyir itiş, Denklem (13)'te verilen maksimum tırmanma itişinin oranı olarak hesaplanmaktadır. Denklem (14)'te bulunan C_{Tdes} ise iniş itme katsayısıdır. Yine bu fazlar için yakıt tüketimi hesabı Denklem (15-17)'de verilmiştir. η İtmeye özgü yakıt tüketimi katsayısı gerçek hava hızının bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Nominal ve seyir yakıt tüketimi itkiye bağlı olarak hesaplanmıştır. C_{fcr} seyir uçuşu için yakıt akışı düzeltme katsayısıdır.

$$\eta = C_{f1} * \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}}\right) \quad (15)$$

$$f_{nom} = \eta * \dot{I}tki \quad (16)$$

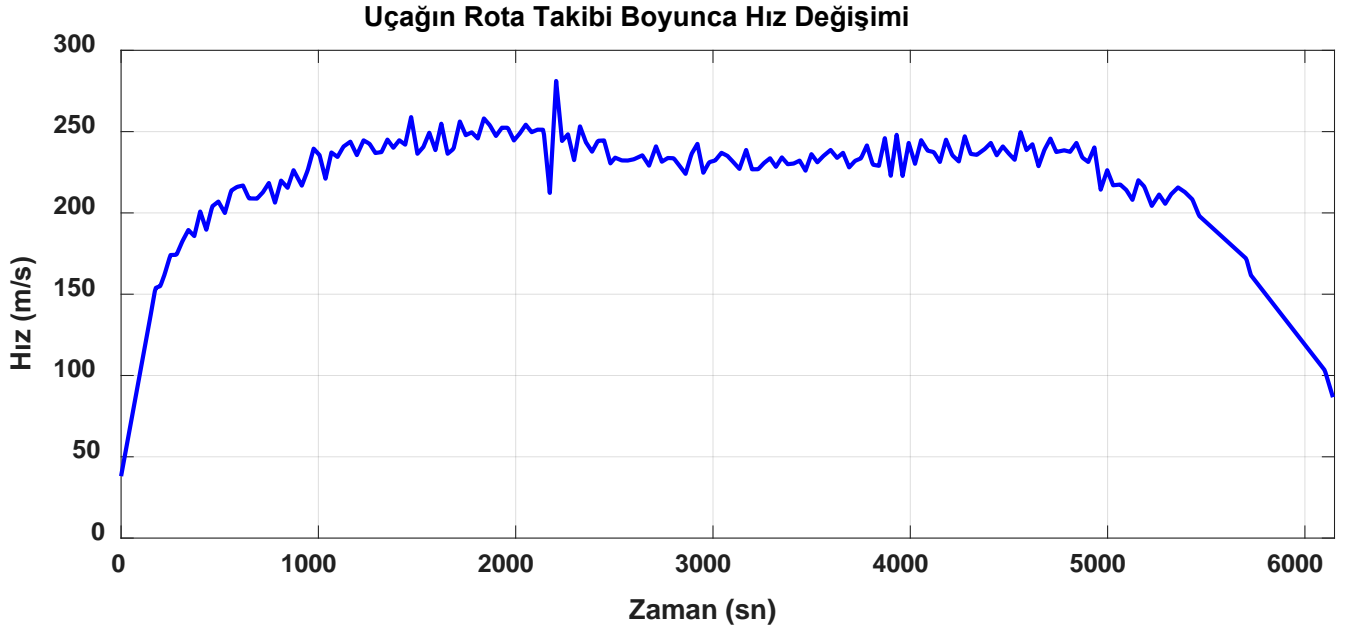
$$f_{cr} = \eta * \dot{I}tki * C_{fcr} \quad (17)$$

BULGULAR (RESULTS)



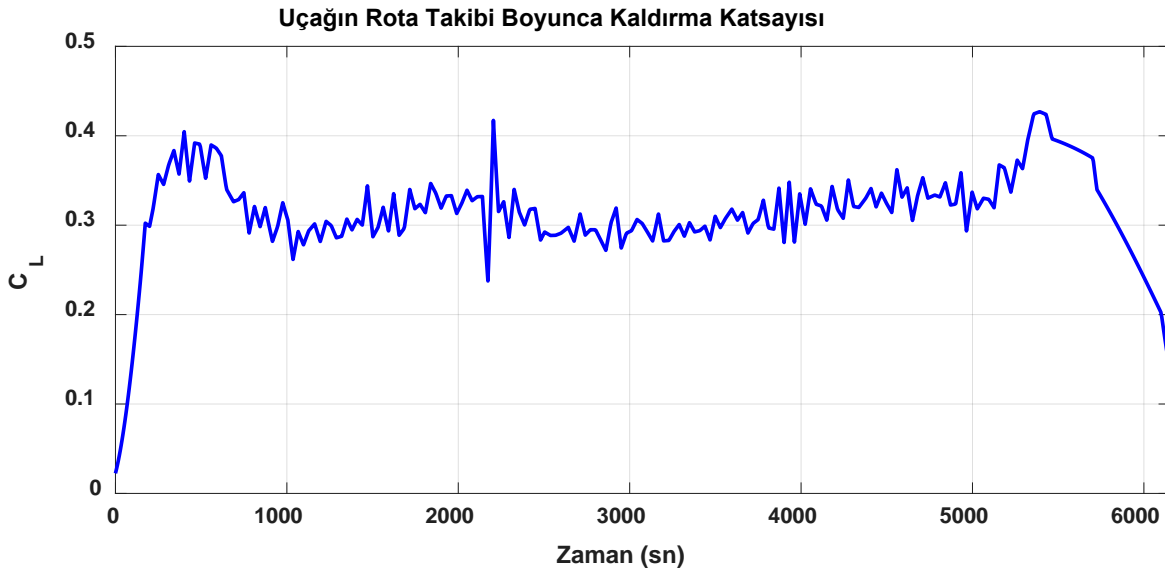
Şekil 1. Uçağın Takip Ettiği Rota (IST-CAI)

Isı, hava yoğunluğu, hava basıncı, kaldırma ve sürüklenme katsayıları modellendikten sonra 3 eksen konumlar, gerçek hava hızı, baş açısı ve kütle değişimi durumları modellenmiştir. Ardından uçuş modu algoritması oluşturularak itkinin ve yakıt tüketiminin modellenmesi yapılmıştır. Modellemenin genel görünümü Şekil 1'de gösterilmiştir. Toplam benzetim 6142 saniye sürmektedir. Çalışmada 3 eksen konum verisi ve hız verisi hazır olarak alınmıştır. Şekil 2'de uçağın irtifası ve X-Y eksenlerindeki koordinatları gösterilmiştir. Uçağın rotasının tam anlaşılabilmesi için rotanın perspektif, X-Y ve X-Z görünümü grafiğe eklenmiştir.



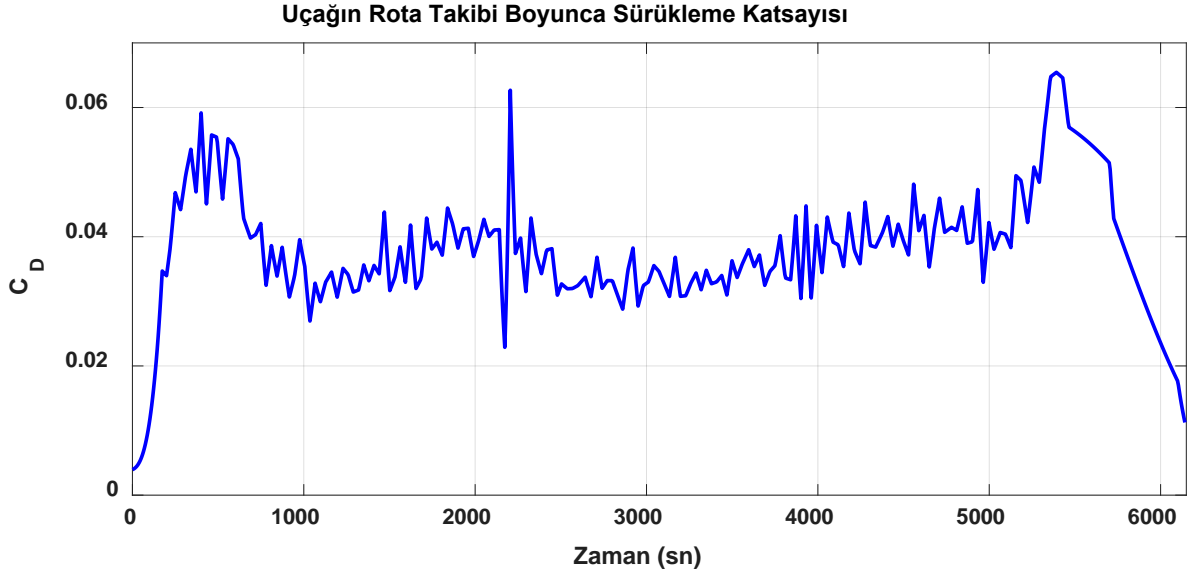
Şekil 3. Uçağın Hız Değişimi

Şekil 3’de bulunan uçağın hız grafiği uçuş yolu açısı ve baş açısı da hesaba katılarak konum verisinin temelinin oluşturmaktadır. Hızın sebep olduğu irtifa ve irtifaya bağlı olan hava yoğunluğu itkide etkili faktörlerdendir. Bu sebeple analiz kapsamında oluşturulan tüm grafiklerde en önemli etkiye sahiptir.



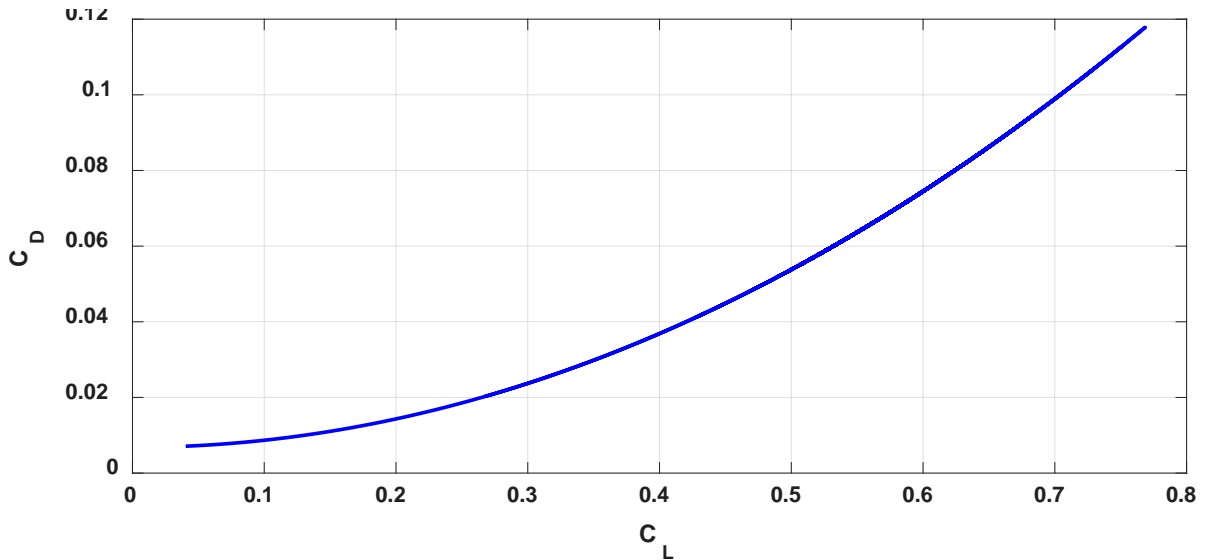
Şekil 4. Kaldırma Katsayısının Değişimi

Şekil 4’te ve Şekil 5’te sırasıyla kaldırma ve sürükleme katsayıları kabul edilebilir düzeyde elde edilmiştir. Kaldırma kuvveti uçağın ağırlığına eşittir. Gerçek hava hızı, hız hesaplaması için kullanıldığı için hızdaki değişimler kaldırma kuvvetine de etki etmiştir. Sürükleme kuvveti katsayısı, indüklenmiş ve parazit sürükleme ifadelerinin toplamıdır. Denklem (5)’te yer alan hesaplamaya C_L katsayısı da dahildir.



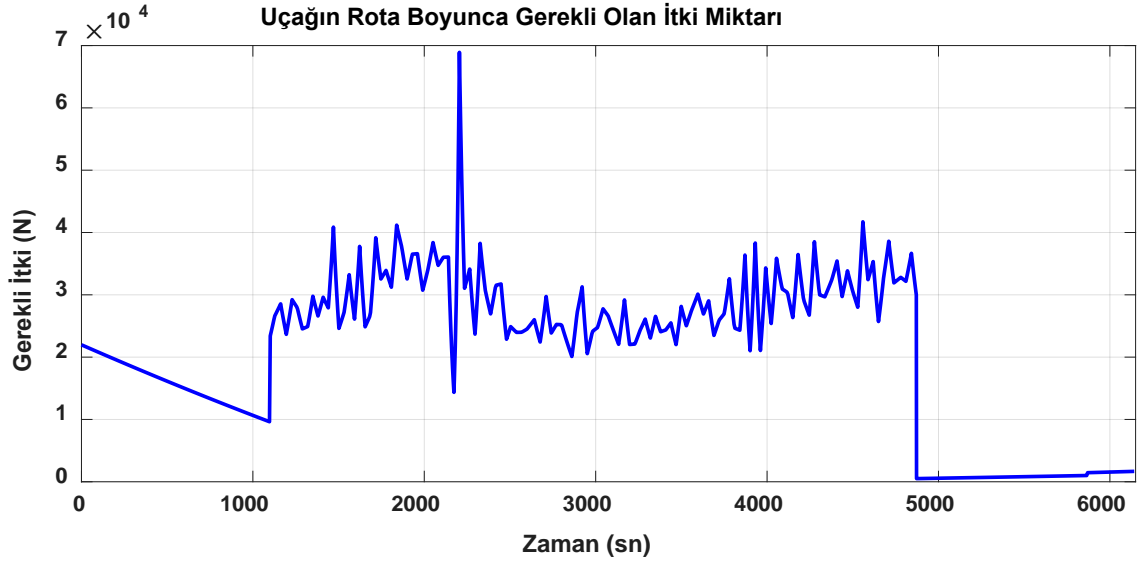
Şekil 5. Sürüklenme Katsayısının Değişimi

Şekil 6'daki C_L - C_D grafiğine göre, başlangıçta parabolik olan ilişki, daha sonra lineer hale gelmiştir. Literatürdeki C_L - C_D grafiğine benzer bir sonuç elde edilmiştir (Sun J. ve ark., 2020).



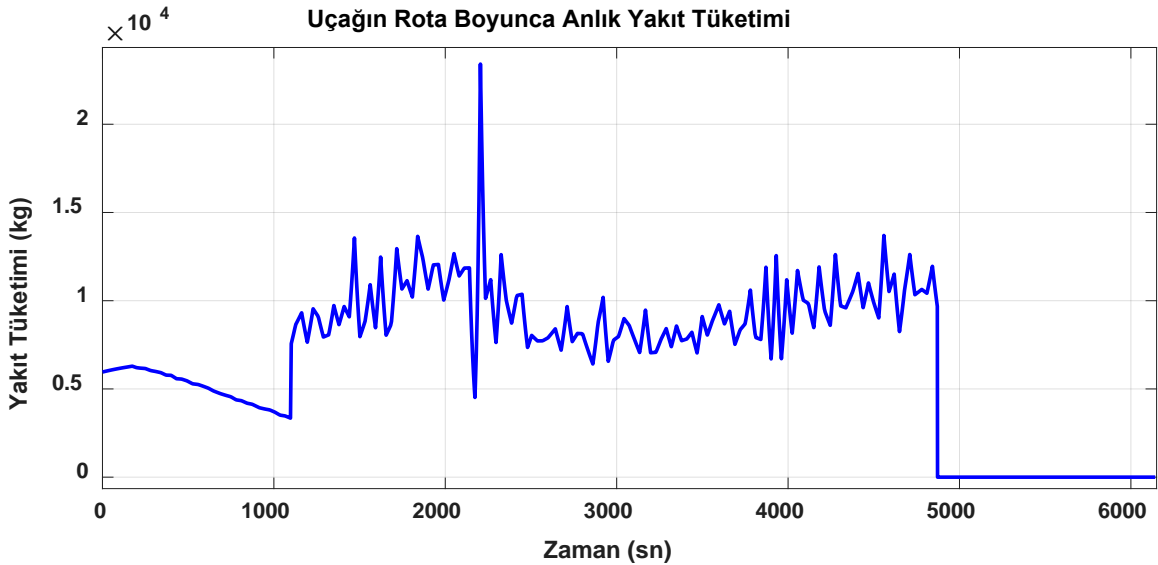
Şekil 6. Uçuş Boyunca Göreli C_L - C_D grafiği

Uçağın itkisi uçuş performansı ile alakalı bir değerken gerekli olan itki motor tasarımı ile alakalı bir değerdir. Hesaplamaları yaparken baz alınan BADA'da farklı motor tiplerine göre farklı hesaplamalar bulunmaktadır.



Şekil 7. Uçak İçin Gerekli Olan İtki

İtki değeri 3 faz içinde Şekil 7'de gösterilmiştir. 1097. saniyeye kadar olan tırmanma fazında gerekli olan itkinin düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi irtifa arttıkça sürüklenme kuvvetinin düşmesidir. Bununla beraber hava yoğunluğu azaldıkça hava beslemeli motorların verimi de aynı zamanda azalmaktadır. Fakat sürüklenme kuvvetinin azalması motor veriminin azalmasından daha baskın olduğu için gerekli itkide bir azalma görülmüştür. 1097- 4872.saniyeler arasındaki seyir uçuşunda gerek duyulan itki uçak hızına bağlı olduğu için değişken olduğu gözlemlenmiştir. 4872-6142.saniyeler arasındaki iniş aşamasında ise gerek duyulan itki değerinin ani bir düşüş yaptığı fakat irtifa kaybı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. Tüm uçuş boyunca gerek duyulan itki miktarı yakıt tüketimi göz önünde bulundurularak gaz ayarının %30-40 aralığında olacak şekilde değerlendirilebilir (Siegel ve Hansman, 2011).



Şekil 8. Anlık Yakıt Tüketim Miktarı

Denklem (16-17) baz alınarak grafik yorumlanacak olursa yakıt tüketim grafiğindeki sonuçlar ile itki arasında doğrudan bağlantı kurulabilir. Tırmanış fazında irtifaya bağlı olarak hava yoğunluğunun azalması ve sürtünme kuvvetinin azalması itkinin azalmasına sebep olur dolayısıyla yakıt tüketimi zamanla azalır. Seyir fazında ise yakıt tüketimi belli bir ortalama etrafında dalgalanmıştır. Bu dalgalanma uçağın hız verileri, gerçek

uçuşun datasından alındığı için oluşmuştur. Gerçek uçuştaki ufak hız değişimleri Şekil 7'de de görüldüğü üzere gerekli itki hesabındaki dalgalanmaya dolayısıyla yakıt tüketimindeki dalgalanmaya sebep olmuştur. Yine iniş aşamasındaki yakıt tüketimi itkiyle doğru orantılı olacak şekilde değişim göstermiştir. Şekil 3, 4, 5, 7 ve 8'de 2000-2300 saniyeleri arasında ani dalgalanma olduğu görülmektedir. Çalışmada 14 Nisan 2022 tarihli THY690 kodlu uçuşun gerçek zamanlı uçuş verisi doğrudan alındığı için bu dalgalanmanın sebebi tam olarak bilinmemektedir.

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında; havacılık öğrencilerinin eğitiminde, özellikle uçuş mekaniği dersinde kullanılmak üzere, MATLAB/Simulink ortamının yetkinliği ortaya konmuştur. BOEING B737-700 uçağının İstanbul'dan Kahire'ye uçuşunun analizi MATLAB/Simulink benzetim ortamı kullanılarak yapılmıştır. İrtifa, düzlemsel koordinatlar ve uçağın hızı gerçek uçuş verilerinden alınmış olup ortam modellemesi, kaldırma ve sürüklenme kuvvet katsayıları, itki ve anlık yakıt tüketimi modelleri Eurocontrol Experimental Centre'nin BADA (Base of Aircraft Data) projesi kapsamında yayınladığı hesaplamalara dayanarak yapılmıştır. Uçağın seyir uçuşu halinde hızın 240 m/s civarında, itkinin 30 kN civarında ve genel CL/CD oranının literatüre uygun elde edilmesi benzetim ortamının gerçek testler için uygun ortam olduğunu ortaya koymuştur. Literatür incelendiğinde, elde edilen sonuçların kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür (Keskin vd., 2021). Sonuç olarak, elde edilen sonuçların gerçek uçuş verileriyle örtüşüyor olması MATLAB/Simulink benzetim ortamının eğitim amacıyla kullanılmasının öğrencilerin sektöre girmeden önceki eğitimlerinde yarar sağlayacağını ortaya çıkarmıştır.

Bu çalışma sonrasında uçuş kararlılığı ve kontrol, seyrü sefer ve yönelim ve diğer havacılık dersleri kapsamında hem sabit kanatlı hemde döner kanatlı hava araçlarının MATLAB/Simulink benzetim ortamının aktif kullanılabilirliği üzerine çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği'nden Dr.Öğr.Üyesi Barış Başpınar hocamızın emeği büyüktür. UCK-322 Uçuş Mekanikliği dersimizin bu çalışma ile sonuçlanabilecek seviyede eğitim verdiğinden dolayı kendisine teşekkürü bir borç biliriz.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- About Aerospace Coordinate Systems - MATLAB & Simulink. (n.d.). www.mathworks.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/about-aerospace-coordinate-systems.html>.
- Aladağ, İ. (2017, Ağustos). *MATLAB/Simulink programı kullanılarak örnek bir fotovoltaik sistemin modellenmesi* [Yüksek lisans tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi].
- Arbaç, S. (2022). *Optimizasyon yöntemlerinin sürü insansız hava araçları (iha) üzerinde simülasyonu* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi].
- Avinal, M. (2000). *A practical Simulink application to predict the response of ship equipment to double sinusoidal distributed shock loading* [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi].
- Batan, E. (2019). *MATLAB Simulink ortamında kullanılabilen Arduino temelli kontrol deney seti tasarımı* [Yüksek lisans tezi, Tarsus Üniversitesi].
- Bektaş, Ö. (2019, Ağustos). *Rüzgar türbinlerinde maksimum güç izleme yöntemleri ve MATLAB/Simulink uygulaması* [Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi].
- Çalışır, A. (2015, Mayıs 20). *Development of a model unmanned aerial vehicle with Simulink : Modelling and control* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2015). *Numerical methods for engineers (7th ed.)*. McGraw-Hill Education, Cop.

- Connect model to FlightGear flight simulator - Simulink.* (n.d.). www.mathworks.com.
<https://www.mathworks.com/help/aeroblks/flightgearpreconfigured6dofanimation.html>.
- Designing a Guidance System in MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink.* (n.d.). www.mathworks.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/designing-a-guidance-system-in-matlab-and-simulink.html>.
- DO Qualification Kit (for DO-178 and DO-254).* (n.d.). www.mathworks.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://www.mathworks.com/products/do-178.html>.
- Duman, Ş. (2008). *Simulink ortamında diz-eklem durum denklem ve sinir bulanık denetim benzetimleri* [Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi].
- Dündar, Ö., Bilici, M., & Ünler, T. (2020). Design and performance analyses of a fixed wing battery VTOL UAV. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(5).
<https://doi.org/10.1016/j.jestech.2020.02.002>.
- Dursun, İ. (2006, Eylül). *Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş. Beyoğlu işletme bölgesi 34,5 kv'luk bir besleme hattının Simulink ile modellenmesi* [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi].
- Equations of Motion - MATLAB & Simulink.* (n.d.). www.mathworks.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/equations-of-motion-1.html>.
- European Organisation for the Safety of Air Navigation EUROCONTROL. (2013). *User manual for the base of aircraft data (BADA) revision 3.11*.
- Figueiredo, H. V., & Saotome, O. (2012). Simulation platform for quadricopter: Using MATLAB/Simulink and X-Plane. *Brazilian Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium*.
<https://doi.org/10.1109/sbr-lars.2012.15>.
- Flight Parameters and Quaternion Math - MATLAB & Simulink.* (n.d.). www.mathworks.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://www.mathworks.com/help/aerobx/flight-parameters-1.html>.
- Generate UAV simulation scenario - MATLAB.* (n.d.). www.mathworks.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://www.mathworks.com/help/uav/ref/uavscenario.html>.
- Gururajan, K. (2022). *Engineering Mathematics IV Lecture Notes*. Malnad College of Engineering, Hassan India. Malnad College of Engineering.
- HL-20 with Flight Instrumentation Blocks - MATLAB & Simulink.* (n.d.). www.mathworks.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/hl-20-with-flight-instrumentation-blocks.html>.
- Hopf, J., Dommaschk, J., Block, N., Reinfeld, R., Krachten, M., Wormann, P., Cracau, D., & Köthe, A. (2020). Unmanned aircraft experimental system: The flying lab for applied flight control and flight mechanics. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*. <https://doi.org/10.25967/530237>.
- İltaş, Y., & Bulut, Ü. (2017). Türkiye'de ar-ge harcamaları ile net satış hasılatı arasındaki ilişki: Bootstrap panel nedensellik testinden kanıtlar. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 0(49), 45–45. <https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.323902>.
- Implement first-order representation of turbofan engine with controller - Simulink.* (n.d.). www.mathworks.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/turbofanenginesystem.html>.
- Implement International Standard Atmosphere (ISA) - Simulink.* (n.d.). www.mathworks.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/isaatmospheremodel.html>.
- Interactively Analyze Telemetry Data with the Flight Log Analyzer App Video.* (n.d.). www.mathworks.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://www.mathworks.com/videos/interactively-analyze-telemetry-data-with-the-flight-log-analyzer-app-1605166028756.html>.

- Kandemir, K. (2006). *MATLAB ve Simulink kullanarak lqr ve kutup yerleşimi metotları ile tepe vinci kontrolü* [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi].
- Karadağlı, Ö., & Çulha, O. (2014). 16MnCr5 esaslı rot parçasının soğuk dövme işlemi ile üretim simülasyonu ve üretim süreçlerinin optimizasyon parametrelerinin incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 16(47), 27–40.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/deumffmd/issue/40809/492369>.
- Keskin, G., Durmus, S., Karakaya, M., & Kushan, M. C. (2021). Designing and producing a bird-inspired unmanned sailplane. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 93(6), 1052–1059.
<https://doi.org/10.1108/aeat-02-2021-0054>.
- Kılınç, E. S. (2010, Ağustos). *Dynamic analysis of a flexible four bar mechanism with using MATLAB Simulink* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Liu, X., & Cao, Y. (2010). Design of UAV flight control system virtual prototype using Rhapsody and Simulink. *2010 International Conference on Computer Design and Applications*, 3.
<https://doi.org/10.1109/icdda.2010.5541430>.
- Özcan, B., & Orgun, F. (2022). Frequency domain analysis of F-16 aircraft in a variety of flight conditions. *International Journal of Aviation Science and Technology*, 1(1).
- Represent Tustin pilot model - Simulink*. (n.d.). www.mathworks.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/tustinpilotmodel.html>.
- Sezer, H., & Orgun, F. (2017). Hemşirelik eğitiminde simülasyon kullanımı ve simülasyon modeli. *Ege Üniversitesi Hemşirelik Fakültesi Dergisi*, 33(2), 140–152.
<https://dergipark.org.tr/en/pub/egehemsire/issue/32885/283062>.
- Siegel, D. (2012). *Development of an autoland system for general aviation aircraft* [Yüksek lisans tezi, Massachusetts Institute of Technology].
- Simulink Verification and Validation Products*. (n.d.). www.mathworks.com.
<https://www.mathworks.com/products/transitioned/simverification.html>.
- Sun, J., Hoekstra, J. M., & Ellerbroek, J. (2020). Estimating aircraft drag polar using open flight surveillance data and a stochastic total energy model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114, 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.026>.
- Sun, J., Hoekstra, J., & Ellerbroek, J. (2018). Aircraft Drag Polar Estimation Based on a Stochastic Hierarchical Model. *Eight SESAR Innovation Days*
https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/sid/2018/papers/SIDs_2018_paper_75.pdf.
- UAV Package Delivery - MATLAB & Simulink*. (n.d.). www.mathworks.com.
<https://www.mathworks.com/help/uav/ug/uav-package-delivery.html>.
- UAV Toolbox Product Overview*. (n.d.). Content-Mathworks.highspot.com. Ziyaret edildi Mart 9, 2022, erişim <https://content-mathworks.highspot.com/viewer/621c69f77e458b0abd700ad7?iid=5f72996f998ae4764e8f5780&source=email.621c69f77e458b0abd700ad8.0>.
- Yücel, P. (2020, Nisan). *Sabit kanatlı insansız hava araçlarında çoklu otopilot sistemleri* [Yüksek lisans tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi].