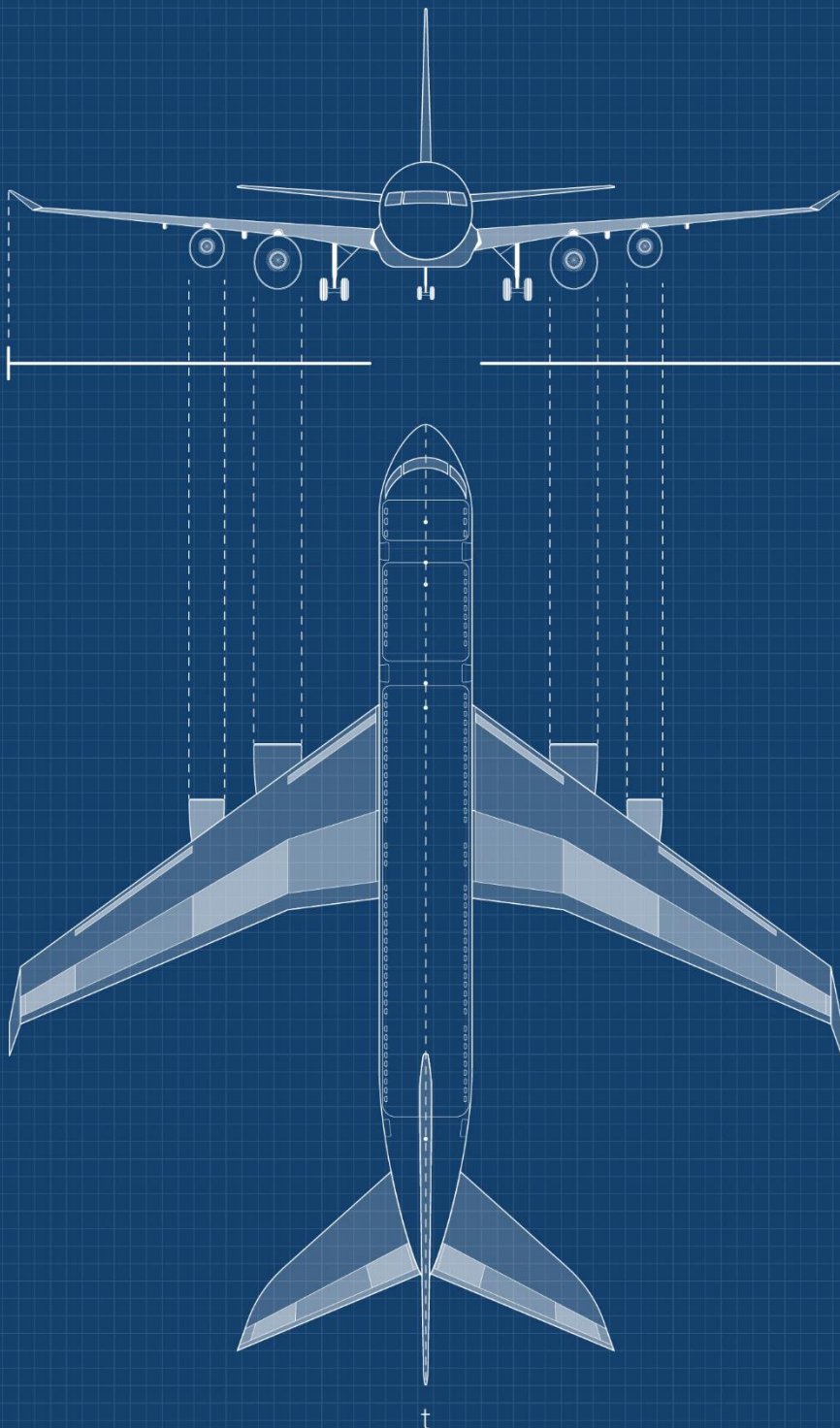


VOLUME: 3 ISSUE: 1

ASREL

Aerospace Research Letters



NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
AEROSPACE RESEARCH LETTERS (ASREL)

E- ISSN: 2980-0064

Cilt/Volume: 2, Sayı/Issue: 2 (Haziran / June 2024)
Uluslararası Hakemli Dergi / International Peer Reviewed Journal

Sahibi / Owner
Necmettin Erbakan Üniversitesi / Necmettin Erbakan University

Editör / Editor-in-Chief
Dr. Öğr. Üyesi Engin Hasan ÇOPUR

Yardımcı Editör / Associate Editor
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ

Yayın Türü / Publication Type
Sürelî Yayın / Periodical

Yayın Periyodu / Publication Period
Yılda 2 kez yayınlanır (Haziran ve Aralık) / Published twice-annual (June and December)

Baskı Tarihi / Print Date
Haziran / June 2024

Yazışma Adresi / Correspondence Address
Necmettin Erbakan Üniversitesi Köyceğiz Yerleşkesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi
Dekanlığı, Köyceğiz Mah. Demeç Sok. No:42/C PK: 42140 Meram/ KONYA

Tel / Phone: (0 332) 325 20 34

Web: <https://www.asreljournal.com>
E-posta / E-mail: info@asreljournal.com

ASREL yılda 2 kez yayınlanan uluslararası hakemli bir dergidir /
ASREL is an international peer reviewed twice-annual journal

Baş Editör

Dr. Öğr. Üyesi Engin Hasan ÇOPUR

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Türkiye

Editör Yardımcısı

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Türkiye

Alan Editörleri

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Akif GÜNDÜZ

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Yönetimi Bölümü, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi Muhammet ÖZTÜRK

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi Özgür DÜNDAR

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi Tarık ÜNLER

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, Türkiye

Mizanpaj

Öğr. Gör. Dr. Mustafa Tefik HEBEBCİ

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilimsel Yayınlar Koordinatörlüğü, Türkiye

İçindekiler / Contents

Makale adı / Title of the article Yazar(lar) / Author(s)	Sayfa/Page
Al Tel Takviyeli Tabakalı Kompozitin Düşük Hızlı Darbe Davranışı Low Velocity Impact Behavior of Al Wire Reinforced Layered Composite <i>Hakan Burak KARADAĞ, Mehmet Cihad ŞAHİN, Mesut UYANER</i>	1-14
Comparison of PID Coefficients Determination Methods for Aircraft Pitch Angle Control PID Katsayılarını Belirleme Metotlarının Uçak Yunuslama Açısı Kontrolü için Kıyaslaması <i>Saliha KÖPRÜCÜ, Muhammet ÖZTÜRK</i>	15-26
İHA'larda İtki İçin Kullanılan Mikro Turbojet Motorun Hava Kompresörünün Termodinamik Analizi Thermodynamic Analysis of An Air Compressor of Micro Turbojet Engines Used for Propulsion in UAVs <i>Ali İSMAYİLLİ, Mahmut Sami BÜKER</i>	27-43
Türkiye ve G-20 Ülkelerinin Havacılık Sektöründe Etkinlik Analizi Efficiency Analysis of Turkey and G-20 Countries in Aviation Sector <i>Serkan TUNÇ, Abdullah GÖK, Ahmet VURAL, Muhammed Emre SARIKAYA, Ali Arda KARAASLAN, Beyzanur ÇAYIR ERVURAL</i>	44-68
Use of Microstrip Antennas in Aerospace Applications: L5 Band Satellite Communication Example Havacılık Uygulamalarında Mikroşerit Anten Kullanımı: L5 Band Uydu Haberleşme Örneği <i>Özgür DÜNDAR, Mustafa Furkan ATEŞ</i>	69-78

Al Tel Takviyeli Tabakalı Kompozitin Düşük Hızlı Darbe Davranışı

Hakan Burak KARADAĞ^{1*}  Mehmet Cihad ŞAHİN²  Mesut UYANER³ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzun Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Geliş Tarihi: 16.04.2024
Kabul Tarihi: 04.06.2024
Yayın Tarihi: 30.06.2024

Anahtar Kelimeler:

Ağırlık Düşürme,
Düşük Hızlı Darbe Deneyi,
Tabakalı Kompozit Malzeme,
Alüminyum Tel Takviye.

Kauçuk karışımı PU polimer, katmanlı kompoziti oluşturmak için 1050 Al levha ile birlikte özelleştirilmiş bir kalıpta kürlenmiştir. Polimer katman, farklı Al tel ekran sıraları kullanılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirilmiş kompozit paneli tek seferde üretmek için yeni bir yaklaşım ortaya konmuştur. Düşük hızda darbe testi yapmak için özel olarak yapılmış bir düşme ağırlığı aparatı kullanılmıştır. Düşen ağırlık testleri, numunelerin darbe davranışını incelemek için beş farklı enerji seviyesinde (40J, 60J, 80J, 100J ve 120J) gerçekleştirilmiştir. Her bir olay için kuvvet-zaman geçmişi kaydedilmiştir. "Enerji-zaman" ve "kuvvet-yer değiştirme" değişimleri ASTM D7136/D7136M-12 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kinematik analiz ile elde edilmiştir. Hiçbir numunede delinme meydana gelmemiştir. Numuneler katmanlı olduğundan, penetrasyon sadece üst katmanda gözlenmiştir. Ayrıca, tepe kuvvetleri, soğurulan enerji ve darbe ucunun batma değerleri de sunulmuştur. Çarpma sonrasında katmanlı kompozit yapılarda meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Polimer katmanındaki Al elek teli takviyesinin, 120 J'deki testler hariç, düşük hızlı darbe tepkisi üzerinde önemli bir etkisi gözlenmemiştir.

Low Velocity Impact Behavior of Al Wire Reinforced Layered Composite

Article Info

ABSTRACT

Received: 16.04.2024
Accepted: 04.06.2024
Published: 30.06.2024

Keywords:

Drop weight,
Low Velocity Impact
Experiment,
Laminated Composite
Materials,
Aluminum Wire
Reinforcement.

Rubber-blend PU polymer was cured in a customized mold together with 1050 Al sheets to create the layered composite. The polymer layer was strengthened using different rows of Al wire screen. A novel approach to fabricate a reinforced composite panel in one spot was introduced. A specifically made drop weight apparatus was used to conduct a low velocity impact test. Drop weight tests were carried out at five distinct energy levels (40J, 60J, 80J, 100J and 120J) to examine the impact behavior of the specimens. Force-time histories were saved for each event. The "energy-time" and "force-displacement" variations were also obtained by kinematic analysis performed in accordance with ASTM D7136/D7136M-12 standard. No puncture occurred in any specimen. Since the specimens were layered, penetration was observed only in the top layer. In addition, the peak forces, the absorbed energy and the impact tip's indentation are also presented. Damage to the layered composite structures after impact was investigated. No significant effect of Al sieve reinforcement in the polymer layer was observed on the low velocity impact response, except for the tests at 120 J.

To cite this article:

Karadağ, H. B., Şahin, M. C., & Uyaner, M. (2024). Al tel takviyeli tabakalı kompozitin düşük hızlı darbe davranışı. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(1), 1-14. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.3.4>

*Sorumlu Yazar: Hakan Burak KARADAĞ, hbkaradag@erbakan.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ

Geleneksel malzemelerin yerini ileri teknoloji malzemeleri almaktadır. Özellikle savunma sanayii, uzay ve havacılık, zırhlı araçlar ve otomobil sektöründe, özellikle askeri alanda balistik ve darbe dayanımının artırılması için yapılan araştırmalarda ve malzemede oluşan hasarın tespiti ve yeni tasarımların optimum hale getirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Uçağın hasar görmesi durumunda uçuşuna kısmi devam edebileceği düşünülen ikincil yapısal parçalarında da kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Darbe sonucu malzemede meydana gelen deformasyonların kapsamlı bir şekilde incelenmesi, literatüre katkıda bulunması ve havacılıkta bakım personeli için bir referans olarak önemlidir. Başta havacılık ve uzay endüstrisi olmak üzere ileri teknoloji sektörlerinde, geleneksel malzemelere kıyasla faydalı yük ağırlığı için alüminyum tabakalı kompozit malzemeler tercih edilir. Alüminyum içeren kompozitler ve alüminyum içeren malzemeler, yüksek dayanım ve ağırlık oranları nedeniyle, özellikle havacılık ve uzay endüstrisi gibi faydalı yük ağırlığının önemli olduğu birçok sektörde hayati önem taşır.

Basınçla kalıplama ile tabakalı kompozitin üretimi gerçekleştirilir (Al-Rubaye, 2018). Kalıp içerisine katmanlar yerleştirildikten sonra basınç tatbik edilir. Bu yöntem ile elde edilen parçalar homojen olup işçilik maliyeti de düşüktür (Al-Rubaye, 2018; Kumar Dhananjayan, 2013).

Tabakalı kompozitlerden sandviç yapılar öz kısmı hücresel (Çetin & Karadağ, 2023) veya fiber laminatlarda (Bienias & Jakubczak, 2012; Moriniere, 2014) olduğu gibi dolu olmak üzere iki farklı türde imal edilirler. Bu yapıların üst ve alt plakaları ya sonradan öze yapıştırılmakta ya da üretim sırasında plakaların proses esnasında öze kendiliğinden yapışması sağlanır. Bizim çalışmamızda polimerin alt ve üst plakalara doğrudan adhezyonu gerçekleştirilmiştir.

Üretilen panellere yabancı madde çarpmasını incelemek için düşük hızlı darbe deneyleri yapılır. Bu yabancı madde, hav araçlarının iniş veya kalkışı sırasında pistten gelen taş, çakıl, cıvata vs. gibi herhangi bir madde olabilir. Uçağın yapısalına olan bu çarpma uçuşa engel teşkil edecek sonuçlar doğurabilir (Hussin vd., 2016; Masniza vd., 2019). Son yıllarda savunma sanayisi, uzay ve havacılık endüstrisi, zırhlı araçlar ve otomobil endüstrisinde balistik ve düşük hızlı darbe direnci yüksek yeni tasarımların ortaya konulmasının önemi artmaktadır.

Kompozit malzemeler, kullanıldıkları zamanlarda hasara neden olabilecek darbe yüklerine uğrayabilirler. Bu sebeple can ve mal kayıplarına yol açabilecek bu hasarların irdelenmesi ve hasarların neden olduğu darbe yükünün laboratuvar ortamında benzeşiminin yapılması büyük önem taşımaktadır. Karşılaşılan bu durumların deney ortamında en iyi benzeşimi sağlayacak düzenek ağırlık düşürme testidir. Ağırlık düşürme testlerinin ana inceleme konusu olduğu çalışmalar üçe ayrılabilir. Birincisi tamamen deneysel çalışmalar (Çetin & Karadağ, 2023), ikincisi analitik çalışmalar (Vaidya, 2011) üçüncüsü de sanal testlerdir (Dağ vd., 2022, 2023). Bu çalışma tamamen deneysel olup özgün olarak üretilen malzemeler, ağırlık düşürme testine tabi tutulmuştur.

Geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında, kompozit malzemelerin üretim, bakım ve onarım maliyetleri oldukça yüksektir. Kompozit malzemelerde meydana gelen hasarların onarımı yüksek maliyetli olup uzman personel gerektirir. Bu bakım maliyetini düşürmek, aynı zamanda geri dönüştürülebilir malzeme ile üretimin yapılması ve hava aracı bakım personeline bir rehber olması adına yapılan bu çalışmada düşük hızlı darbe sonucunda malzemede meydana gelen hasar tipleri incelenmiştir. Literatürde geri dönüştürülebilir malzeme ile farklı tabakalı kompozitlerin davranışlarını inceleyen, deneysel ve analitik çalışmalarının sınırlı olduğu görülmüş. Bu nedenle mevcut çalışmanın literatüre önemli bir katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Geri dönüştürülmüş malzeme ile yapılan malzemeler üzerine son zamanlarda çokça çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar arasında üretilen numunelerin düşük hızlı darbe testi yapılanlar bizim

araştırmamızda ilgi konusu olmuştur. Buna örnek olarak bir çalışmada geri kazanılmış PP kompozitlere ağırlık düşürme testi uygulanmıştır (Alcock vd., 2006). Denizlerdeki midye kabuğu kullanılarak üretilen başka bir materyali düşük hızlarda çarpma davranışı incelenmiştir (Koçhan, 2019). Bu çalışmada öne çıkan bulguların başında midye kabuklarının hiçbir işlem yapılmadan matris ile güçlü bir bağlantı oluşturması gelmektedir.

Çetin ve Karadağ, uçak ve diğer ulaşım araçlarında iç döşeme malzemesi olarak kullanılacak sandviç panel üretmişler ve üretilen numunelere 20J, 30J, 40J, 50J enerjilerinde darbe testleri gerçekleştirmişlerdir. Tel ilavesinin artmasıyla, malzemede görülen elastikiyetin azalıp, mukavemet değerinin arttığı ve bunun sonucunda maksimum deplasmanın genelde azaldığı sonucuna varmışlardır (Çetin & Karadağ, 2023). Çalışmada kullanılan çelik tel dayanımı artırmış olsa da hava araçlarında korozyon direnci olan paslanmaz malzemeler ve hafif olması sebebiyle alüminyum daha çok tercih olması sebebiyle, bu çalışmada alüminyum tel ve üretim sonucunda dayanım/ağırlık oranı yüksek olabilecek polimer kullanımı tercih edilmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışmada polimer dolgulu Al sandviç numuneler üretilmiştir. Kauçuk-parçacık eklenmiş PU hammaddesi Selçuk Kauçuk (Konya) kuruluşundan edinilmiştir. Kuruluştaki bu malzeme ayakkabı taban imalatında kullanılmakta olup bunun reçetesi ticari sır olduğu gerekçesiyle bizlere verilmemiştir. Polimer çekirdeğe güçlendirici olarak Al 1050 elek teli kullanılmıştır. Sandviç yapının alt ve üst plakaları olarak havacılık endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılan Al 1050 seçilmiştir. Polimer ve katmanların birbiri ile yapışmaları için plakalar pürüzlendirilmiştir. Tablo 1, pürüzlülük değerlerini vermektedir.

Tablo 1

Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri

Aritmetik Ortalama Pürüzlülük, Ra (μm)	2,287
Kuadratik Ortalama Pürüzlülük, Rq (μm)	3,092
Maksimum Pürüzlülük Derinliği, Rz (μm)	16,479

Alüminyumun kalınlığı 0,53 mm olarak ölçülmüştür. Levha halindeki polimer hammaddesinin kalınlığı 1,45 mm'dir. Alüminyum eleğin tel çapı 0,2 mm olup göz boyutu da 2 mm'dir.

Tabakalı kompoziti oluşturacak bileşenlerin muhtelif konfigürasyondaki kütleleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2

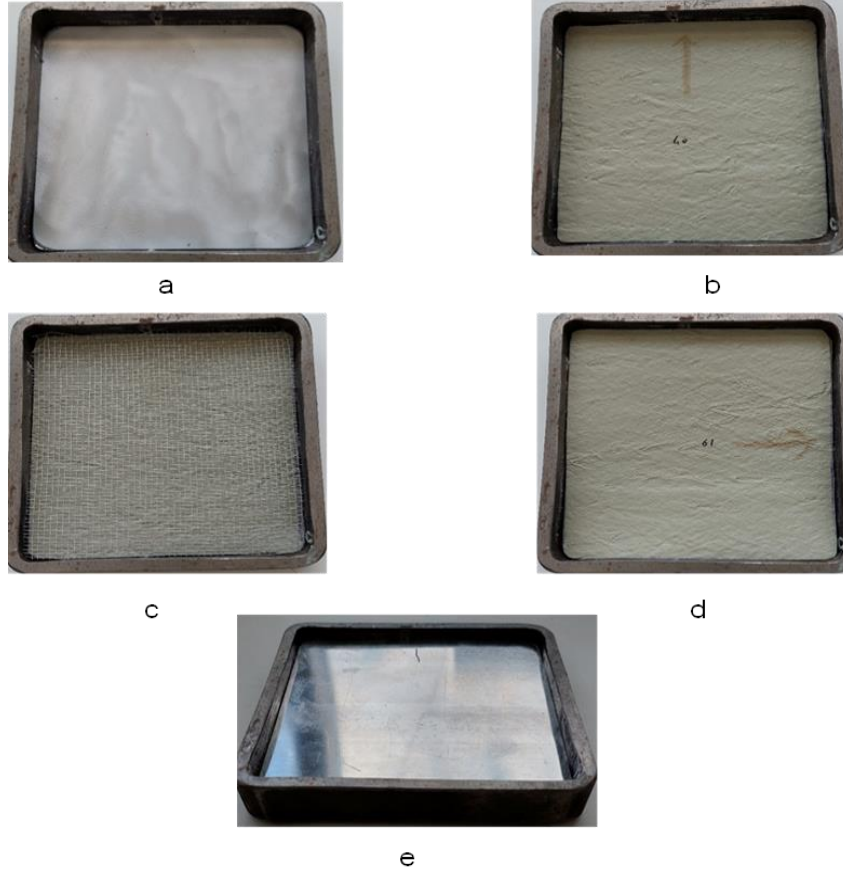
Bileşen Ağırlıkları

Bileşen	Ağırlık (g)
Polimer Tabaka (120x120x1,45mm)	8,636
Al Tel Elek (120x120x0,75mm)	0,935
Al Plaka (120x120x0,53mm)	20
Al – 4 Polimer – Al	54,544
Al –2 Polimer–1 Tel Elek–2 Polimer–Al	55,479
Al – 1 Polimer – 1 Tel Elek– 1 Polimer – 1 Tel Elek– 1 Polimer – 1 Tel Elek– 1 Polimer – Al	57,349

Şekil 1, sandviç numuneyi oluşturan bileşenlerin dizilimini göstermektedir. Bu bileşenler yüksekliği 15 mm olan bir kalıp içerisinde yerleştirilmiştir. Numunelerin kalıba yapışmadan kolayca çıkması için kalıp ayırıcı kullanılmıştır.

Şekil 1

Malzemelerin kalıba dizilimi a) Alt yüzeye, yüzeyi pürüzlendirilmiş alüminyum konulması b) Alüminyum üstüne polimerlerin konulması c) Alüminyum tel eleğin konulması. d) Polimer ilavesi e) Üst yüzeye, yüzeyi pürüzlendirilmiş alüminyum konulması



Bu kalıp içindeki malzemeler sıcaklığı 215°C olan bir fırında 60 dakika bekletilmiştir. Fırından çıkarılan kalıbın tutucuları hızlı bir şekilde çıkarılarak tabakalı kompozitin genişlemesine müsaade edilmiştir. Önceden ısıtılmış fırına tabakalar, fırının ısısını düşürmeden, ivedilikle fırına yerleştirilir. Pişme süresi tamamlanan numuneler fırından alınarak, kalıptan çıkarılır. Üretim yapılırken uygun sıcaklık ve basınçta pişirme işlemi gerçekleşmesinin sebebi, dolgu malzemesinin alüminyum yüzeylere yapışarak kabarak pişmesi için en uygun üretim şekli olduğu için tercih edilmiştir.

Tablo 3, pişirme öncesi ve sonrasında bileşenlerin toplam kalınlıkları göstermektedir. Pişme sonrası kalınlıklar genişleme sonrasında ölçülmüştür.

Tablo 3

Pişme Öncesi ve Sonrası Kalınlıklar

Malzemeler	Pişme öncesi kalınlık (mm)	Pişme sonrası kalınlık (mm)
Al-4P-Al	6,8	13,5
Al-2P-T-2P-Al	7,55	11,8
Al-P-T-P-T-P-T-P-Al	9,05	10,9

Tablo 4, proses parametrelerini içermektedir.

Tablo 4
Proses parametreleri

Kalıp boyutları	120x120x15mm
Fırın sıcaklığı	215 °C
Fırında bekleme süresi	60 dakika

Ağırlık Düşürme

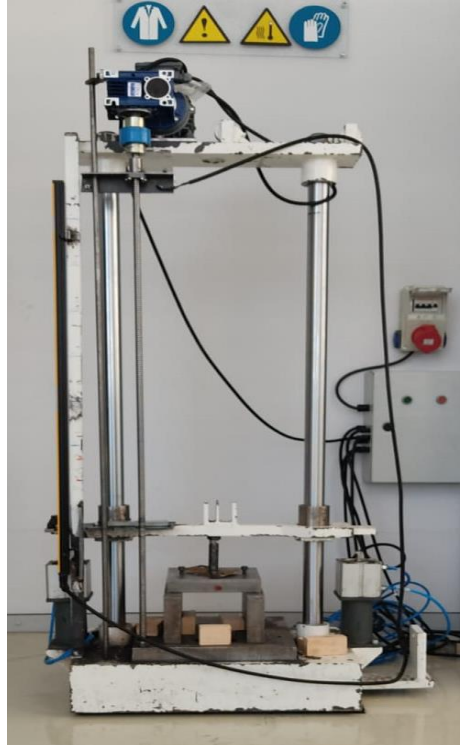
Elde edilen uygun sıcaklık ve basınç değerlerinde üretilen tabakalı kompozit malzeme için, yaşam döngüsü boyunca maruz kalabileceği farklı darbe enerjilerini simüle etmek için düşük hızlı darbe deneyi yapmak için özel olarak üretilen ağırlık düşürme test düzeneğinde testler yapılmıştır.

Deney düzeneğinin vurucusu 17 kg'dır. Darbeler, 12 mm yarıçapındaki yarı-küresel bir çelik vurucu ile numunelerin merkezlerine yapılmıştır. Tekrarlı darbelerden kaçınmak için ilk darbeden sonra vurucu tutulmuştur. Kuvvetin zamana bağlı değişimi, darbe süresi boyunca bir veri toplama kartı yardımıyla bilgisayara kaydedilmiştir.

Test cihazında PLC kontrollü olarak bir dijital cetvel yardımıyla vurucu istenilen yüksekliğe kadar çıkarılmaktadır. Deneye hazır olduğunda bir bağlatma düğmesi ile vurucu mıknatıslı tutucudan kurtulmakta ve test numunesi üzerine serbest düşme yapmaktadır. Yine dijital cetvelden alınan konum bilgisi ile vurucu numuneye çarptıktan sonra havalı sistem tetiklenmekte ve tutucu malzemeye penetre olduğunda havalı pistonlar ile vurucu numuneden yukarıya doğru kaldırılmakta ya da vurucu numuneden geri sektiğinde vurucu numuneye ikinci vuruşu yapmadan açılan pistonlar üzerine düşmektedir (Şekil 2).

Şekil 2

Düşük Hızlı Darbe Test Cihazı



Ağırlık düşürme testinde, enerjinin potansiyel ve kinetik enerjiye dönüşümünün yanı sıra bir kısım enerji numunede hasara harcanmaktadır. Kaymalı yatak ve hava sürtünmesi ihmal edilecek kadar küçüktür. Vurucu kütlesi belli olduğundan darbe enerjisi doğrudan belli bir yüksekliğe çıkarılmış vurucunun potansiyel enerjisine eşit olmaktadır. Çarpma anındaki darbe başlangıç hızı enerjinin korunumu ilkesiyle kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Bu açıklamalar ışığında öngörülen, 40, 60, 80, 100 ve 120 J darbe enerjilerine karşılık gelen düşme yüksekliği, darbe hızı hesaplanmış olup bu değerler ile diğer test parametreleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5*Ağırlık Düşürme Test Parametreleri*

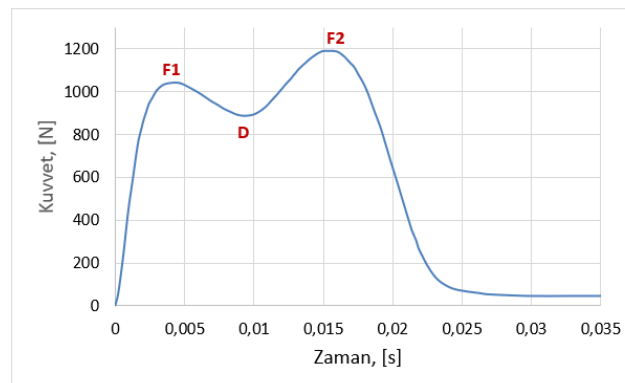
Özellikler	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
Darbe Enerjisi (J)	40	60	80	100	120
Düşüş Yüksekliği (m)	0,24	0,36	0,48	0,60	0,72
Darbe İlk Hızı (m/s)	2,17	2,66	3,07	3,43	3,76
Vurucu Kütlesi (kg)	17	17	17	17	17
Vurucu Çapı (mm)	12	12	12	12	12
Numune Boyutları (mm)	120x120	120x120	120x120	120x120	120x120

Ağırlık düşürme testinde darbe enerjisinin tamamen elastik ve plastik deformasyon ile hasarlara harcadığı kabul edilmiştir.

40, 60, 80, 100 ve 120 J olmak üzere beş değişik darbe enerjileri için ağırlık düşürme testleri gerçekleştirilmiştir. Al kapaklar **Al**, polimer katmanı **P** ve tel takviyesi **T** olmak üzere üç farklı dizilimde numuneler üretilmiştir. Bu üç dizilim sırasıyla **Al/4P/Al**, **Al/2P/1T/2P/Al** ve **Al/P/T/P/T/P/Al** dir. Her bir test üçer kez tekrarlanmıştır.

Deneyler sırasında vurucunun numunelere temas süresince doğan kuvvetler zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Kuvvet geçmişleri kullanılarak kinematik analiz yardımıyla yer-değiştirmeye bağlı kuvvet değişimi ile temas süresince enerji geçmişleri elde edilmiştir (Uyaner, 2021).

Şekil 3 vurucunun bir sandviç numuneyi tamamen deldiği bir darbe testinde elde edilen tipik bir kuvvet geçmişini göstermektedir. Bu tür testlerin kuvvet geçmişlerinde iki adet maksimum nokta ortaya çıkar. Bu noktalara karşılık gelen kuvvetler sırasıyla F1 ve F2 olarak isimlendirilmiştir. Buradaki F1 kuvveti üst plakanın delindiği, F2 kuvveti ise alt plakanın delinme anındaki kuvvetlerdir. Kuvvetin geçmişinde ortaya çıkan bu durum alt ve üst kabuk rijitliğinin dolgu katmanına (çoğunlukla bu dolgu katmanı hücrelidir) göre yüksek olan sandviç kompozitlerde ortaya çıkar.

Şekil 3*Bir Sandviç Kompozitin Ağırlık Düşürme Testinde Ortaya Çıkan Tipik Kuvvet Geçmişi*

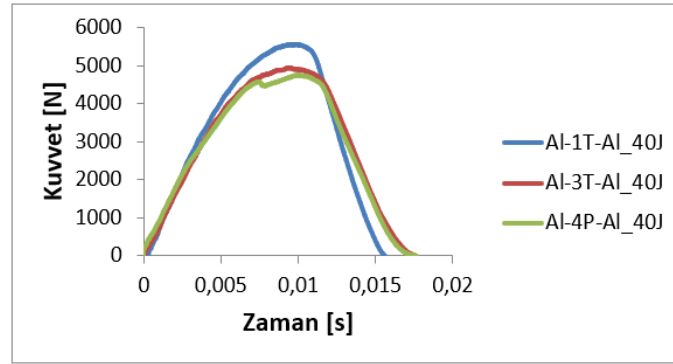
Temas sırasında ortaya çıkan kuvvet, vurucunun üst katmana temasıyla beraber üst plaka yırtılana kadar hızla artar. Üst plaka metal ise çukurcuk oluşumu ve yırtılma ile, metal olmayan kabuklarda da bu kabuğun hasarı ile vurucunun altındaki dolgu hacmi sıkışmaya başlar. Bu sıkışma sonucu dolgunun sıkışma bölgesindeki yoğunluğu artar. Bu olaya densifikasyon denir. Bu yoğunluk artışının nihai noktası kuvvet geçmişinde D noktasına karşılık gelir. Yoğunluğu bölgesel artmış dolgu malzemesi maksimum yoğunluğa eriştikten sonra vurucuya direnç gösterir ve bunun sonucu temas kuvveti tekrar artmaya başlar. Temas kuvvetinin ikinci kez maksimum olduğu F2 noktasında alt plaka delinmeye başlar ve bunun sonucunda kuvvette düşme görülür. Sandviç malzeme delindikten sonra vurucu ile numune arasındaki sürtünme kuvveti nedeniyle temas kuvveti tamamen sıfır olmaz.

BULGULAR

40, 60, 80, 100 ve 120 J olmak üzere beş farklı enerji seviyelerinde yapılan deneylere ait kuvvet geçmişi, yer-değiştirmeye karşılık kuvvet değişimi ve enerji geçmişleri elde edilmiştir. Bu değişimlerin tamamı (MCŞ 2023) te mevcuttur. 120 J için olan hariç diğer darbe enerjisi için bulgular birbirine benzemektedir. Değerlendirme için sadece 40J ve 120 J deneylerine ait grafikler takdim edilmiştir (Şekil4 - Şekil 9).

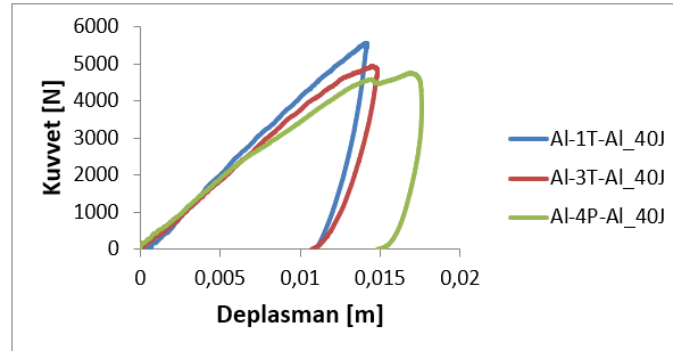
Şekil 4

40J İçin Kuvvet Geçmişi



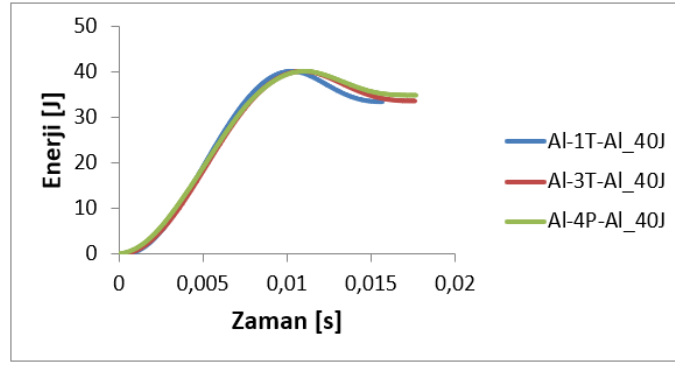
Şekil 5

Yer değiştirmeye bağlı kuvvet değişimi (40J)

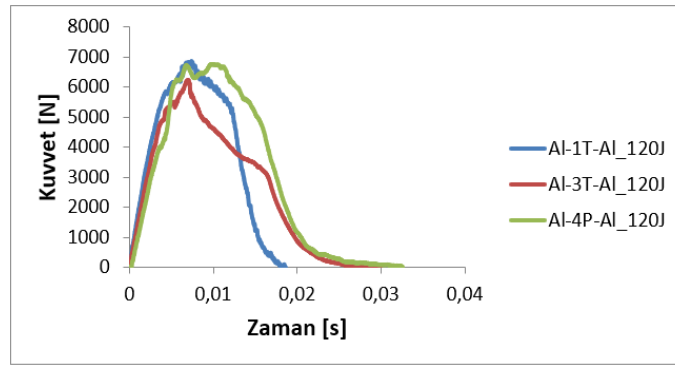


Şekil 6

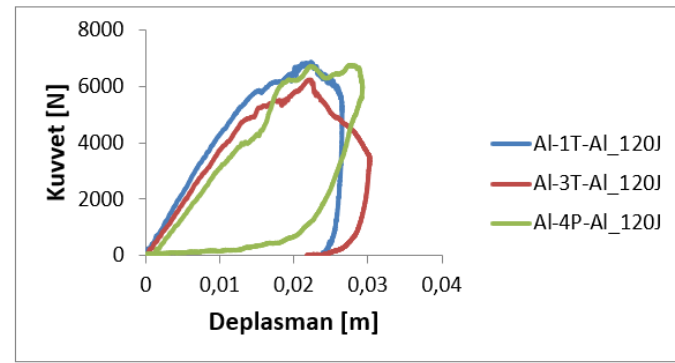
40J için enerji geçmişi



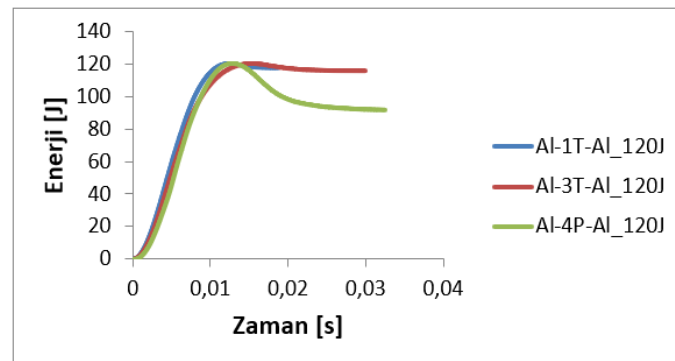
Şekil 7
120J için Kuvvet Geçmişi



Şekil 8
Yer Değiştirmeye Bağlı Kuvvet Değişimi (120J)

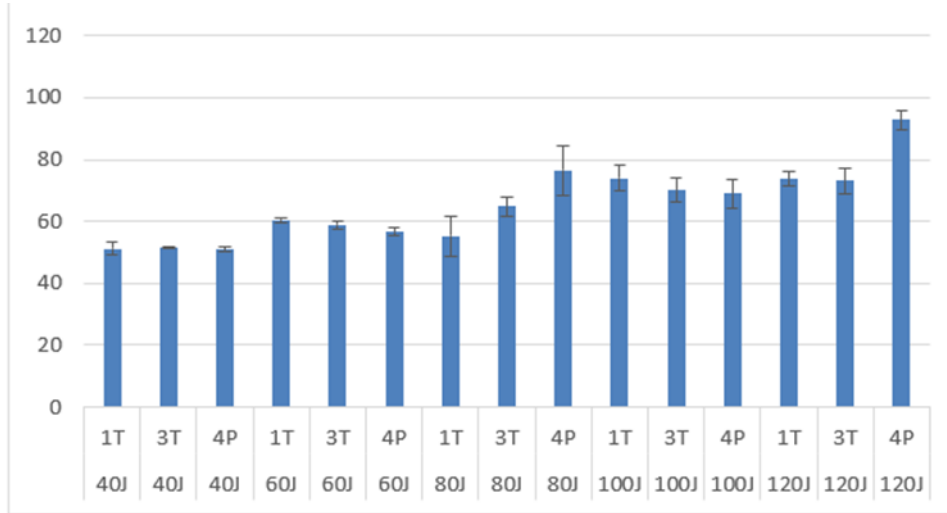


Şekil 9
120J için Enerji Geçmişi

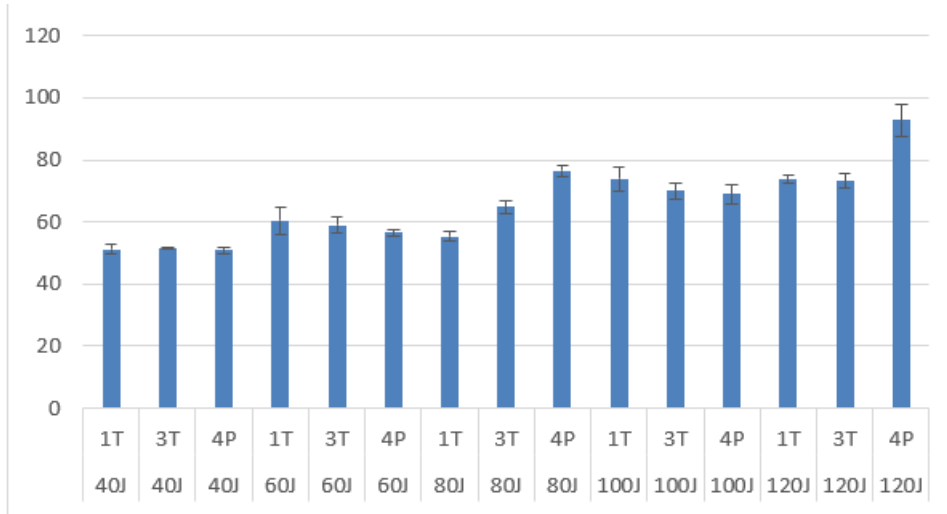


Teste tabi tutulan numunelerin hiçbirinde alt plakalar delinmemiştir. Bunun sonucu olarak kuvvet geçmişlerinde ikinci tepe noktası oluşmamıştır.

Şekil 10
İtki Kuvvetleri















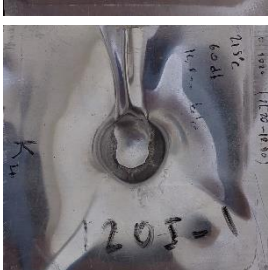


Şekil 11
Yutulan Enerjiler



Test edilen numunelerin itki kuvvetleri ve yutulan enerjiler sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de görülmektedir. Çekirdek tabakasına Al tel takviyesinin yutulan enerji bakımından tüm enerji seviyelerinde anlamlı bir değişikliğe yol açmamıştır. Tel ilaveli ve tel ilavesiz numunelerde vurucunun temas süresi hemen hemen aynı görülmektedir. 120J değerindeki 4 kat polimer ve telsiz olan numunede anlamlı bir fark görülürken, diğer değerlerde anlamlı bir sonuç görülmemiştir. Darbelerin tekrar sayısının artması ya darbelerin tekrarlanması ya da orta hızlı darbelerle deneylerin gerçekleşmesi anlamlı sonuçlar ortaya çıkarabilir.

Tablo 6, darbe testi sonrası kompozit plakalarda meydana gelen hasarları özetlemektedir. Tüm numunelerde delinme gerçekleşmemiştir. Ağırlıklı olarak her numunede batmalar ve kompozitin üst katmanında vurucu ucunu çevreleyen hat boyunca yırtılmalar oluşmuştur.

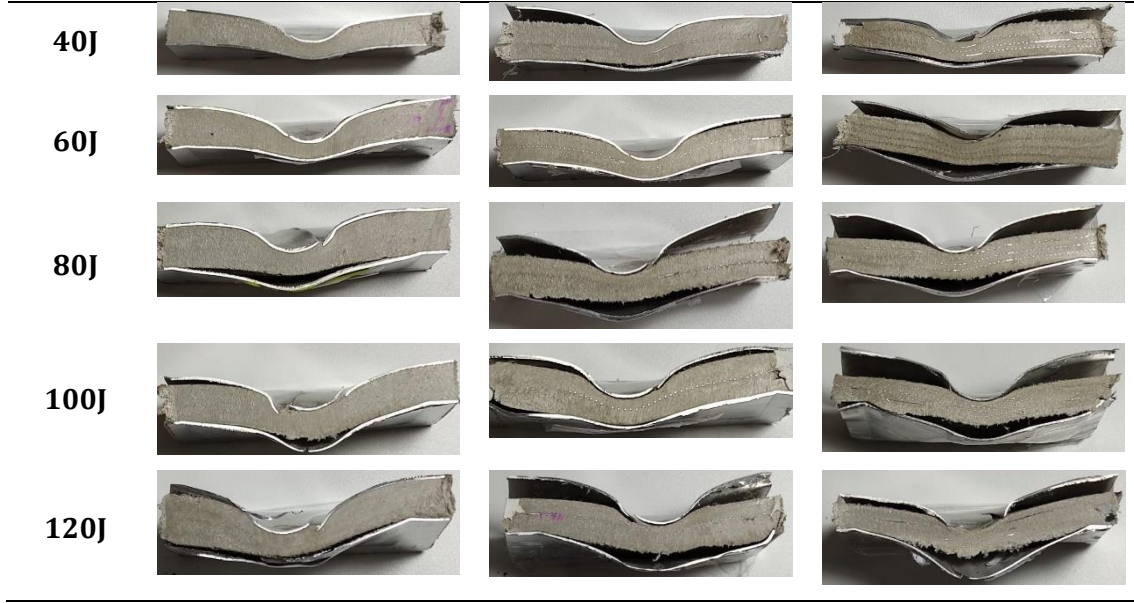
Tablo 6
Numune Ön Yüzlerine Ait Hasar Görüntüleri

<i>E</i>	Al/4P/Al	Al/2P/1T/2P/Al	Al/P/T/P/T/P/T/P/Al
40J			
60J			
80J			
100J			
120J			

Tablo 7, darbe testi uygulanmış numunelerin kesit görüntülerini içermektedir. Numunelerde ya üst plaka ya alt plaka ya da her iki plaka ile polimer arasında delaminasyon oluşmuştur.

Tablo 7
Hasarlı Numunelerin Kesit Görüntüleri

<i>E</i>	Al/4P/Al	Al/2P/1T/2P/Al	Al/P/T/P/T/P/T/P/Al
----------	----------	----------------	---------------------



TARTIŞMA

Kürleme fırının sıcaklık dağılımının düzgün olmaması nedeniyle numunelerin bazı kısımlarında kalınlık farklılıkları oluşmuştur. Ayrıca alüminyum tel elek sayısının artması ile birlikte polimerin genişmesi negatif olarak etkilenmiştir. Bunun sebebi olarak alüminyum eleğin ortamdaki ısıyı soğurması görülmüştür. Bunun yanında Al tellerin polimerlerin birbiriyle etkileşime girerek yeteri kadar yapışmasına ve kabarmasına engel olduğu düşünülmüştür.

Darbe testleri esnasında elek ilaveli numunelerde alt ve üst tabakalarda delaminasyon artışı gözlemlenmiştir. Al tel takviyeli kompozit panel üretim sürecinin yeniden planlanarak farklı bir üretim prosesin geliştirilmesi sonucuna varılmıştır.

Elek ile polimer tabakaları arasında bir ayrılma görülmemiştir. Bu nedenle polimerin elek tabakasına yeterince nüfuz ettiğini söyleyebiliriz.

SONUÇ

Bu çalışma için gerçekleştirilen darbe testlerinde hiçbir numune tam penetrasyona ulaşamamıştır. Elek telli numuneler, alüminyum tel ekranın katmanlı yapıyı güçlendirmesi beklenmesine rağmen, alüminyum sandviç plakalarda delaminasyon hasarının arttığını göstermiştir. Soğurulan enerji, artan darbe enerjisiyle orantılı olarak artmıştır. Numunelerin hiçbiri tam penetrasyon göstermese de 100 J ve 120 J okumaları, elek teli eklenmemiş numunelerin maksimum enerji emilim değerine ulaştığını göstermektedir. 120 J'de, Al tel ekranın etkisi görülebilir. 120J'nin altındaki enerji seviyelerinde önemli bir fark görülmemiştir.

ÖNERİ

Al tellerinin elek tel açıklığı daha fazla olan tercih edilebilir. Bunun için yeni bir proses ile üretimler düşünülebilir.

Alüminyum sandviç plakalar ile polimerin yapışmasını iyileştirecek ikincil bir polimer kullanılabilir.

Etik Beyan

Bu çalışma Mehmet Cihad Şahin'in Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yapmış olduğu "Al Tel Takviyeli Tabakalı Kompozitin Düşük Hızlı Darbe Davranışı" isimli yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışmada etik kurul onayı gerektiren insan veya hayvan denekleri kullanılmamıştır. Araştırma, kamuya açık veri setleri, literatür taramaları veya teorik analizler üzerinden yürütülmüştür. Etik kurallar gereği, araştırma sürecinin her aşamasında akademik dürüstlük ve bilimsel etik kurallara tam uyum sağlanmıştır. Bu nedenle, etik kurul onayı gerekmemiştir.

Yazar Katkıları

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) Mesut UYANER (%60) – Hakan Burak KARADAĞ (%40)

Veri Toplama (CRediT 2) Mehmet Cihad ŞAHİN (%100)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Mesut UYANER (%50) – Hakan Burak KARADAĞ (%30) Mehmet Cihad ŞAHİN (%20)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Mesut UYANER (%75) – Mehmet Cihad ŞAHİN (%25)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Mesut UYANER (%10)

Finansman

Çalışma, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 211316001 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 9 Sanayi, Yenilikçi ve Altyapı

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 12 Sorumlu Üretim ve Tüketim

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 13 İklim Eylemi

REFERANSLAR

- Alcock, B., Cabrera, N., Barkoula, N., & Peijs, T. (2006). Low velocity impact performance of recyclable all-polypropylene composites. *Composites Science and Technology*, 66(11-12), 1724-1737. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.11.010>
- Al-Rubaye, M. M. J. (2018). *Low Velocity Impact Behavior of Glass Fiber and Carbon Fiber Reinforced Composites* [MSc.]. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bienias, J., & Jakubczak, P. (2012). Low velocity impact resistance of aluminium/carbon-epoxy fiber metal laminates. *Composites Theory and Practice*, 12(3), 193-197.
- Çetin, Ş., & Karadağ, H. B. (2023). Tabakalı kompozitlerin darbe direncinin incelenmesi. *Aerospace Research Letters (ASREL) Dergisi*, 2(2), 114-127. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2023.2.5>
- Dağ, T., Yıldırım, N., Kepir, Y., & Uyaner, M. (2022). E/cam epoksi laminelerin üzerine uygulanan düşük hızlı darbe davranışının sayısal simülasyonu. *Aerospace Research Letters (ASREL) Dergisi*, 1(1), 1-10. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2022.1.1>
- Dağ, T., Yıldırım, N., Şentürk, G., Durmazoğlu, M., Yıldırım, S., & Uyaner, M. (2023). Virtual investigation on the response of Glare to low velocity impact. *2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/RAST57548.2023.10198016>
- Hussin, R., Ismail, N., & Mustapa, S. (2016). A study of foreign object damage (FOD) and prevention method at the airport and aircraft maintenance area. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 152(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/152/1/012038>
- Koçhan, C. (2019). Low velocity impact behaviour of recycled mussel shell particles reinforced epoxy composites. *Materials Research Express*, 6(8), 85105. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab21ff>
- Kumar Dhananjayan, V. (2013). *Design and Analysis of a Compression Molded Carbon Composite Wheel Center* [Yüksek Lisans]. The University of Texas at Arlington, Faculty of the Graduate School.
- Masniza, Y., Zulfabli, H. M., Amarul, T., Khairunnisa, S. N., Zilawati, N. A. R. N. N., Nazera, D., & Ismalina, H. N. (2019). Potential FOD defects on the composite material. *AIP Conference Proceedings: 5th International Conference on Green Design and Manufacture (IConGDM 2019)*, 2129(July). <https://doi.org/10.1063/1.5118064>
- Moriniere, F. D. (2014). *Low-velocity impact on fibre-metal laminates* (C. 2, Sayı 2012). <https://doi.org/doi.org/10.4233/uuid:022e1a88-f48e-493e-805e-014f396a05dc>
- Uyaner, M. (2021). *Test to graph*. Mendeley Data, Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.17632/gydhpktxjk.2>
- Vaidya, U. K. (2011). Impact Response of Laminated and Sandwich Composites. İçinde S. Abrate (Ed.), *Impact Engineering of Composite Structures* (ss. 97-191). Springer Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0523-8_4

EXTENDED ABSTRACT

Purpose: It has been noticed that there are few studies in the literature examining the behavior of recyclable materials and different layered composites and conducting experimental and analytical studies, and this study aims to fill the missing part of the literature.

Theory and Method: The layered composite was produced by curing the rubber blended PU polymer together with 1050 Al sheets in a special mold. Various rows of Al wire screen were used to reinforce the polymer layer. A new method to produce a reinforced composite panel in one spot was tested.

Results: No puncture occurred in any specimen. Since the specimens were layered, penetration was observed only in the top layer. In addition to all these curves, the maximum force values, the energy absorbed by the layered composite structure and the indentation depth of the impact tip obtained from the low-speed impact test are also shown.

Conclusion: In response to the increasing impact energy, the amount of energy absorbed increased. While full penetration was not observed in any sample, values of 100 J and 120 J show that the maximum energy absorption value was reached in samples without sieve addition. The effect of aluminum sieve wire can manifest itself at a value of 120 J. No significant change was observed at impact energy levels lower than 120 J.

Comparison of PID Coefficients Determination Methods for Aircraft Pitch Angle Control

Saliha KÖPRÜCÜ¹  Muhammet ÖZTÜRK^{1*} 

¹ Necmettin Erbakan University, Aviation and Space Sciences, Aircraft Engineering, Konya, Turkey

Article Info

Received: 26.04.2024
Accepted: 26.06.2024
Published: 30.06.2024

Keywords:

Astrom and Hagglund,
Longitudinal Motion,
Modified Ziegler-Nichols,
PID Controller,
Pitch Angle,
Tyreus-Luyben,
Ziegler-Nichols.

ABSTRACT

For aircraft to perform a stable flight, dynamic stability must be ensured during the design phase. Different linear and non-linear control methods are used to ensure that this stability is not disturbed and the necessary maneuvers can be performed. Aircraft is a dynamic system with 6 degrees of freedom and each control surface should be considered when designing control systems. In this study, the pitch angle of an aircraft is controlled using 4 different methods found in the literature. In this study, the linearized longitudinal equations of motion of the aircraft selected for control were extracted and transfer functions were obtained. The methods designated were used to calculate the coefficients of the PID controller and the calculations and modeling were done through MATLAB/Simulink. The methods used in the study are mainly as follows: Ziegler-Nichols, Modified Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben, Astrom and Hagglund. The study aims to determine the best-performing method among these 4 methods for controlling the pitch angle of the aircraft. Comparisons were made on the graphs and tables obtained for the study and the best-performing method was determined.

PID Katsayılarını Belirleme Metotlarının Uçak Yunuslama Açısı Kontrolü için Kıyaslaması

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 26.04.2024
Kabul Tarihi: 26.06.2024
Yayın Tarihi: 30.06.2024

Anahtar Kelimeler:

Astrom ve Hagglund,
Modifiye Edilmiş Ziegler-
Nichols,
PID Kontrolcüsü,
Tyreus-Luyben,
Uzunlamasına Hareket,
Yunuslama Açısı,
Ziegler-Nichols.

ÖZET

Hava araçlarının kararlı bir uçuş sergileyebilmesi için tasarım aşamasında dinamik kararlılığın sağlanmış olması gerekmektedir. Seyir halinde bu kararlılığın bozulmaması ve gerekli manevraların yapılabilmesi için doğrusal ve doğrusal olmayan farklı kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Uçak dinamik olarak 6 serbestlik derecesine sahip bir sistem olup kontrol sistemleri tasarlanırken her bir kontrol yüzeyi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmada, bir hava aracının yunuslama açısının kontrolü literatürde bulunan 4 farklı metot kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada kontrolü yapılmak üzere seçilen hava aracının doğrusallaştırılmış uzunlamasına hareket denklemleri çıkarılmış ve transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Belirtilen metotlar PID kontrolcüsünün katsayılarını hesaplamak için kullanılmış olup yapılan hesaplamalar ve modellemeler MATLAB/Simulink ortamında test edilmiştir. Çalışmada kullanılan metotlar şunlardır: Ziegler-Nichols, Modifiye Edilmiş Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben ve Astrom ve Hagglund. Çalışmanın amacı kullanılan bu 4 metot arasında hava aracının yunuslama açısının kontrolü için en iyi performans göstereni belirlemektir. Çalışma amacı doğrultusunda elde edilen grafikler ve tablolar üzerinden karşılaştırmalar yapılmış ve en iyi performans gösteren metot belirlenmiştir.

To cite this article:

Köprücü, S., & Öztürk, M. (2024). Comparison of PID coefficients determination methods for aircraft pitch angle control. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(1), 15-26. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.3.5>

*Sorumlu Yazar: Saliha KÖPRÜCÜ, salihakoprucu@gmail.com



INTRODUCTION

For aircraft to perform a stable flight, dynamic stability must be ensured during the design phase (Nelson, 1998). Different linear and nonlinear control methods are used to maintain this stability and to perform the necessary maneuvers. In the early years of aviation, the control operations carried out by the aircraft crews were started to be carried out by control methods such as PID, which were developed later (Keane, & Carr, 2013).

Aircraft is a dynamic system with 6 degrees of freedom and each control surface should be considered when designing control systems (Stevens et al., 2015). For this reason, there are many different control studies in the literature due to the complexity of the system. When the literature is examined, it is seen that the PID control method gives agreeable results for UAVs (Ahmed et al., 2019; Durmaz et al., 2013). Determining the control coefficients is of great importance in PID control design, thus determining the system's stability. It is seen from the literature that the Ziegler-Nichols method performs well in determining the PID control coefficients (Ahmed et al., 2019; Ulus & Ikbal, 2019).

Different control approaches have been used in the literature to improve the performance of aircraft systems (Dhadekar & Talole, 2018; Hušek & Narenathreyas, 2016). PID and fuzzy controllers have been investigated for longitudinal control of aircraft and different combinations of these two controllers (Mamdani tuned PID, PID, Takagi-Sugeno, Parallel Distributed Controller (PDC)) have been tested (Narenathreyas, 2013). The results show that nonlinear controllers such as fuzzy control give better results than linear controllers, but the computational load is higher and stability cannot be guaranteed (Narenathreyas, 2013; Öztürk & Özkol, 2021). In addition, since the fuzzy-PID control structure does not show the desired performance improvement, the fuzzy-PID control structure trained by the genetic algorithm has been tested and new methods with better control performances have been proposed (Tang et al., 2001). However, this has made the controllers more complex and computationally demanding.

For the control of aircraft, the use of robust and PID control structures is preferred both to reduce the computational load and to ensure the stability of the aircraft. Ziegler-Nichols (ZN), Modified Ziegler-Nichols (MZN), Tyreus-Luyben (TL), and Astrom-Hagglund (AH) methods were compared to determine the PID coefficients used in longitudinal motion control of aircraft and was observed that the Modified Ziegler-Nichols (MZN) method performed the best (Deepa & Sudha, 2016).

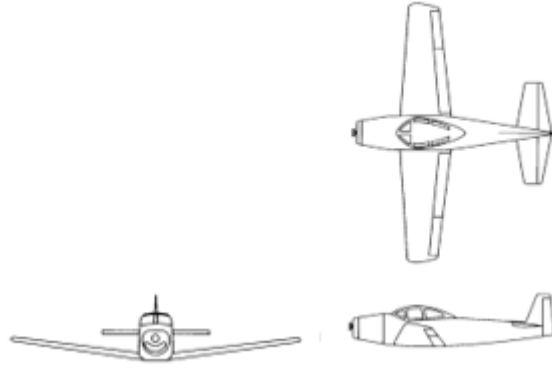
Within the scope of this study, the control methods for the longitudinal motion of aircraft were reviewed in the literature (Rosario-Gabriel & Cortés, 2018) and the Ziegler-Nichols methods available in the literature were tested and compared for pitch angle control of the NAVION aircraft.

METHOD

The data used in the system analysis and modeling in this study are from General Aviation Airplane: NAVION at sea level and $M=0.158$. The calculated motion derivatives of the airplane under the given conditions are used to control the longitudinal motion. The state space representations of the linearized longitudinal equations of motion of the aircraft with 6 degrees of freedom are given below. In addition, the geometrical data of the airplane used in this study and the stability parameters of the longitudinal motion derivatives are shown in the table below.

Figure 1

General Aviation Airplane: NAVION (Nelson, 1998)



State-space representations:

$$\dot{x} = Ax + B\eta \quad (1)$$

State space representation for longitudinal motion;

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{u} \\ \Delta\dot{w} \\ \Delta\dot{q} \\ \Delta\dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u & X_w & 0 & -g \\ Z_u & Z_w & u_0 & 0 \\ M_u + M_{\dot{w}}Z_u & M_w + M_{\dot{w}}Z_w & M_q + M_{\dot{w}}u_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta w \\ \Delta q \\ \Delta \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{\delta} & X_{\delta_T} \\ Z_{\delta} & Z_{\delta_T} \\ M_{\delta} + M_{\dot{w}}Z_{\delta} & M_{\delta_T} + M_{\dot{w}}Z_{\delta_T} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_e \\ \Delta\delta_T \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{u} \\ \Delta\dot{w} \\ \Delta\dot{q} \\ \Delta\dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.09148 & 0.04242 & 0 & -32.17 \\ 10.51 & -3.066 & 152 & 0 \\ 0.2054 & -0.05581 & -2.114 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta w \\ \Delta q \\ \Delta \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -12.64 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_e \\ \Delta\delta_T \end{bmatrix} \quad (3)$$

Table 1

General Aviation Airplane: NAVION (Nelson, 1998)

Dynamic Pressure, Weight, Reference Geometry and Mass Characteristics:		
(Dynamic Pressure) $Q = 1190 \frac{lb}{ft^2}$	(Weight) $W = 2750 \text{ lbs}$	
(Wing Area) $S = 184 \text{ ft}^2$	(Wing Span) $b = 33.4 \text{ ft}$	
(Mean Chord) $\bar{c} = 5.7 \text{ ft}$	$I_{xx} = 1048 \text{ slug.ft}^2$	
$I_{yy} = 3000 \text{ slug.ft}^2$	$I_{zz} = 3530 \text{ slug.ft}^2$	
Longitudinal Motion Derivatives (for M=0.158 and sea level)		
$C_L = 0.41$	$C_D = 0.05$	$C_{L\alpha} = 4.44$
$C_{D\alpha} = 0.33$	$C_{m\alpha} = -0.683$	$C_{L\ddot{\alpha}} = 0.0$
$C_{m\dot{\alpha}} = -4.36$	$C_{Lq} = 3.8$	$C_{m_q} = -9.96$

$$C_{L_M} = 0.0$$

$$C_{L_{\delta_e}} = 0.355$$

$$C_{D_M} = 0.0$$

$$C_{m_{\delta_e}} = -0.923$$

$$C_{m_M} = 0.0$$

Pole graphs of short and long period movements are given below.

Figure 2
Short Period Motion Poles

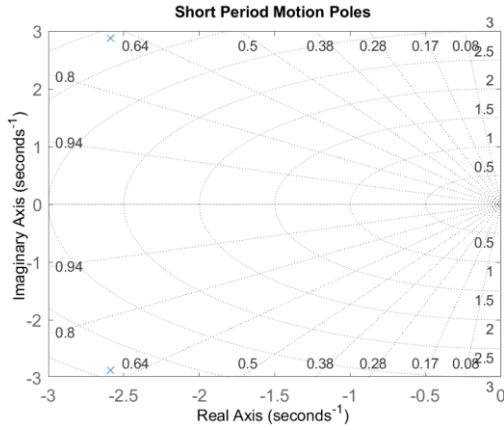


Figure 3
Long Period Motion Poles

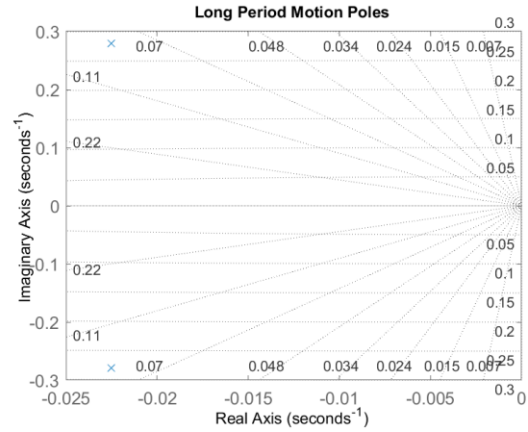


Table 2
Roots and Values for Short and Long Period Motions

Motion	Short Period	Long Period
Roots	$-2.59 \pm 2.87i$	$-0.0225 \pm 0.279i$
Damping ratio	0.67	0.0804
Frequency (rad/s)	3.87	0.28

Pitch Displacement Control

The transfer function of the rate of change of the pitch angle to the elevator deflection angle is given below by equation 4;

$$\frac{\Delta q(s)}{\Delta \delta_e(s)} = \frac{-12.64s - 38.75424}{s^2 + 5.18s + 14.96} \quad (4)$$

The transfer function used in the system design for the control of the pitch angle is given by the following equation;

$$\frac{\Delta \theta(s)}{\Delta \delta_e(s)} = \frac{1}{s} \frac{\Delta q(s)}{\Delta \delta_e(s)} = \frac{-12.64s - 38.75424}{s(s^2 + 5.18s + 14.96)} \quad (5)$$

Before adding the PID controller to the system, a motor transfer function was also added as $\left(-\frac{10}{s+10}\right)$ and the step input and root locus curve were generated. The results are given as graphics in Figure 3-4;

Figure 4
Short Period Motion Poles

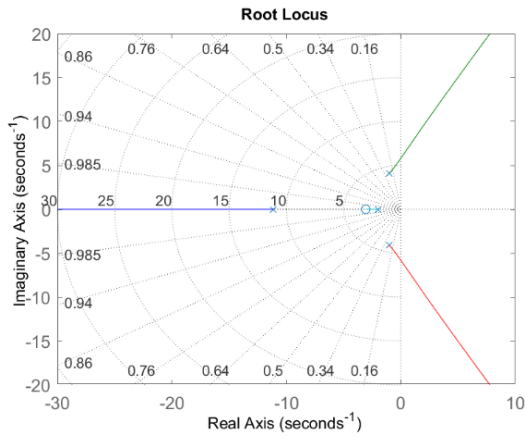
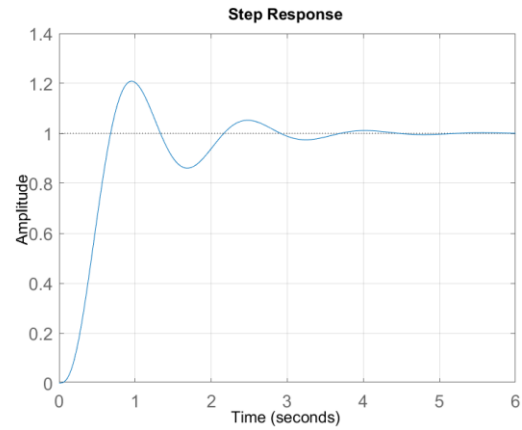


Figure 5
Long Period Motion Poles



In the next four subsections, the coefficients K_p , K_i , K_d of the PID controller added to the system are calculated separately by Ziegler Nichols, Modified Ziegler Nichols, Tyreus-Luyben, Astrom and Hagglund methods.

1. Ziegler-Nichols Method

K_p , K_i , K_d coefficients for the PID controller were calculated using the Ziegler-Nichols method in the following order (Deepa & Sudha, 2016):

1. Starting with a small value of K_p (in this study we started with a value of 1), coefficients K_i , K_d were taken as 0,
2. Increasing the K_p value little by little until neutral stability is achieved. At this stage, starting from a value of 1, K_p was increased until a neutrally stable graph was obtained, which was $K_p = 2.863$,
3. To record the critical $K_{p@neutral\ stability}$ value obtained in the previous stage as K_u and to record the oscillation period at this value as T_u . At this stage, the period was measured in several places on the graph obtained using Simulink, the average value of 1.079 was determined as T_u .

$$4. \quad K_p = 0.6 \times K_u = 0.6 \times 2.863 = 1.718$$

$$T_i = \frac{T_u}{2} = 0.5395$$

$$T_d = \frac{T_u}{8} = 0.1349$$

the above values were calculated.

5.

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 3.184$$

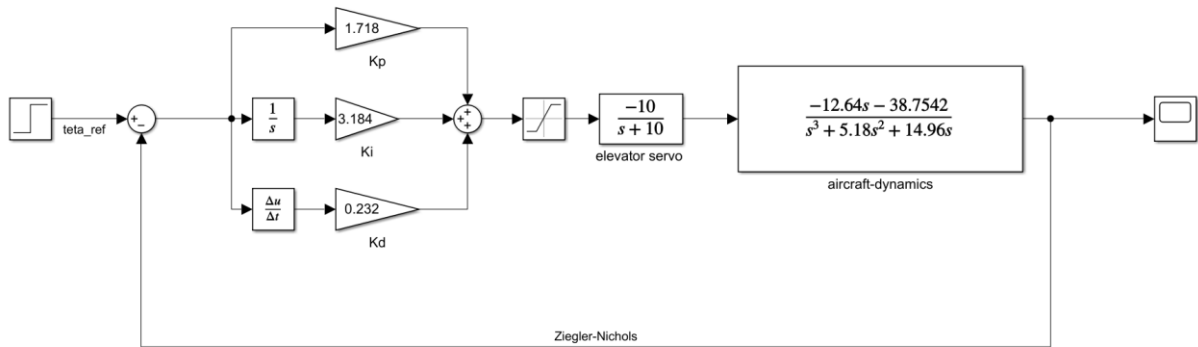
$$K_d = K_p \times T_d = 0.232$$

the above values were calculated.

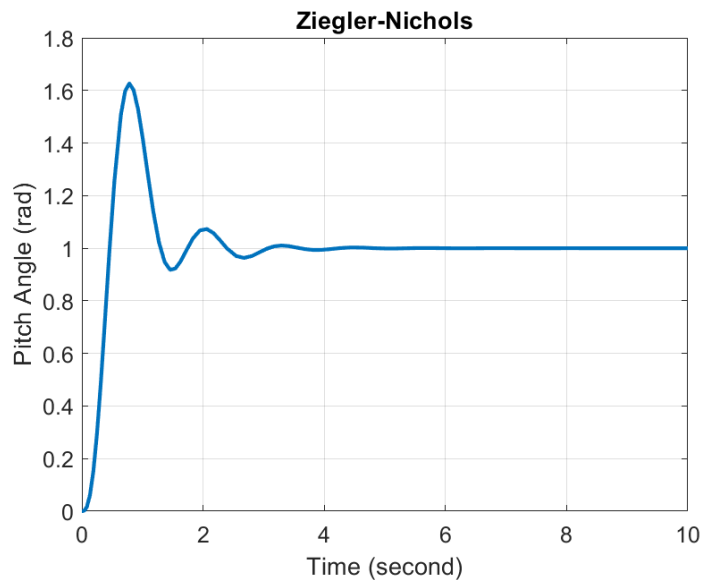
By substituting the PID coefficients to be used for the pitch angle control designed in Simulink using the calculated coefficients, the following block diagram is obtained;

Figure 6

Block Diagram of the Control System Designed Using the Ziegler-Nichols Method

**Figure 7**

Step Response Graph for Ziegler-Nichols Method



2. Modified Ziegler-Nichols Method

When calculating the coefficients of the PID Controller with the Modified Ziegler Nichols Method, only the 4th and 5th steps change as given below;

$$K_p = 0.33 \times K_u = 0.33 \times 2.863 = 0.9405$$

$$T_i = \frac{T_u}{2} = \frac{1.084}{2} = 0.5395$$

$$T_d = \frac{T_u}{3} = 0.359$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 1.752$$

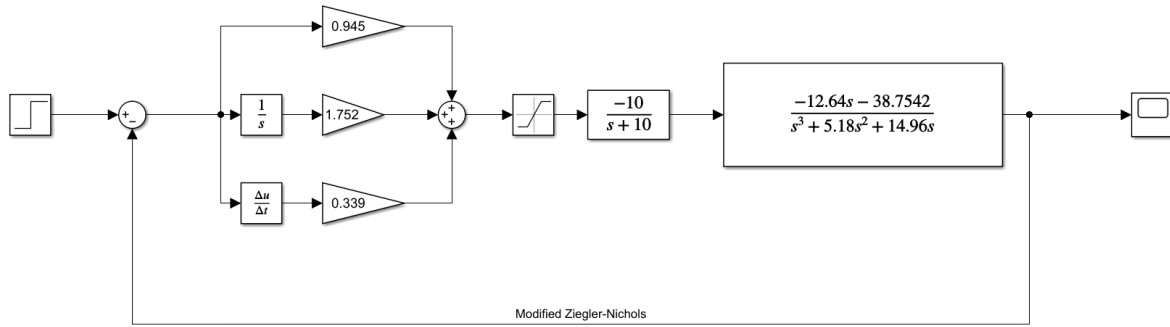
$$K_d = K_p \times T_d = 0.339$$

In this case, when the calculated coefficients are substituted for the PID coefficients to be used

for the pitch angle control designed via Simulink, the block diagram obtained is as follows;

Figure 8

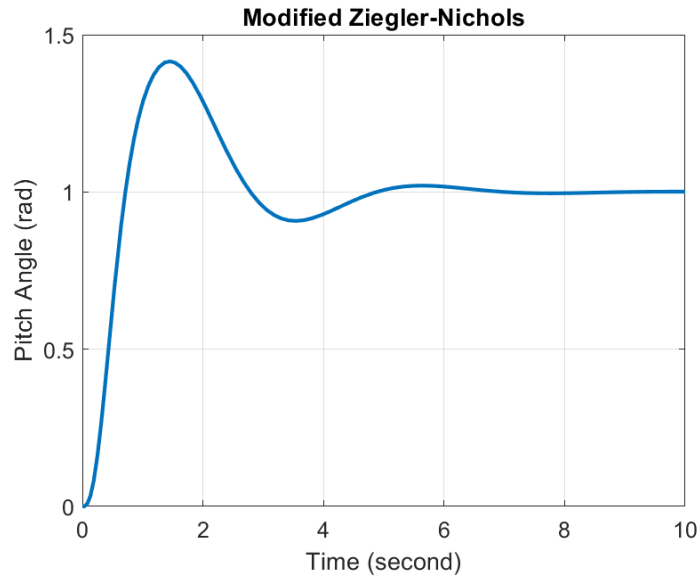
Block Diagram of the Control System Designed Using the Modified Ziegler-Nichols Method



The step response graph obtained in this case was obtained as follows.

Figure 9

Step Response Graph for the Modified Ziegler-Nichols Method



3. Tyreus-Luyben Method

When calculating the coefficients of the PID Controller with the Tyreus-Luyben Method, the 4th and 5th steps change as follows;

$$K_p = 0.45 \times K_u = 0.45 \times 2.863 = 1.288$$

$$T_i = 2.2 \times T_u = 2.374$$

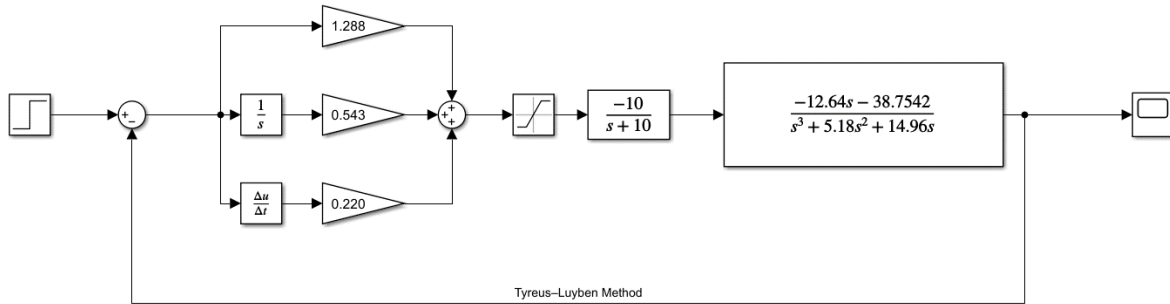
$$T_d = \frac{T_u}{6.3} = 0.171$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 0.543$$

$$K_d = K_p \times T_d = 0.220$$

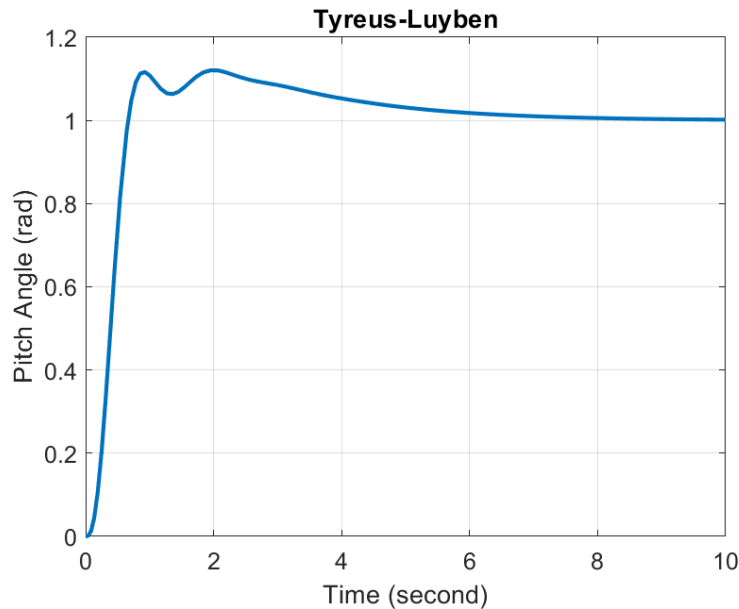
In this case, when the calculated coefficients are substituted for the PID coefficients to be used for the pitch angle control designed via Simulink, the block diagram obtained is as follows;

Figure 10
Control System Block Diagram Designed Using Tyreus-Luyben Method



The step response graph obtained in this case was obtained as follows;

Figure 11
Step Response Graph for Tyreus-Luyben Method



4. Astrom and Hagglund Method

When the coefficients of the controller are calculated by the Astrom and Hagglund Method, the 4th and 5th steps change as follows;

$$K_p = 0.32 \times K_u = 0.32 \times 2.863 = 0.916$$

$$K_i = 0.94$$

In this case, when the calculated coefficients are substituted for the PI coefficients to be used for the pitch angle control designed via Simulink, the block diagram obtained is as follows

Figure 12
Block Diagram of Control System Designed Using Astrom and Hagglund Method

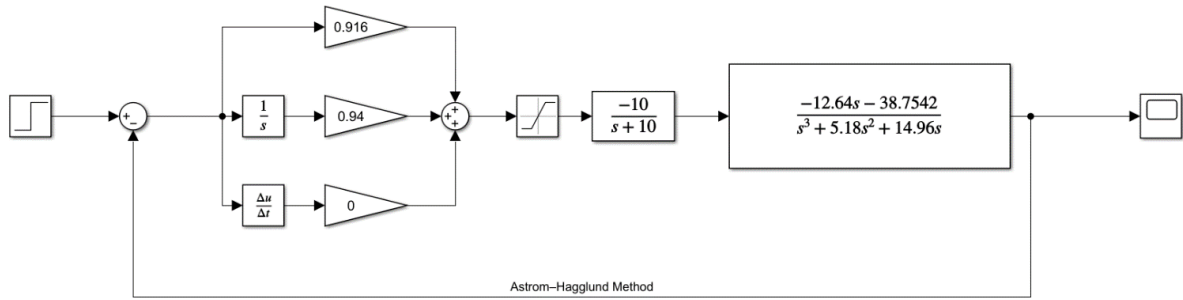
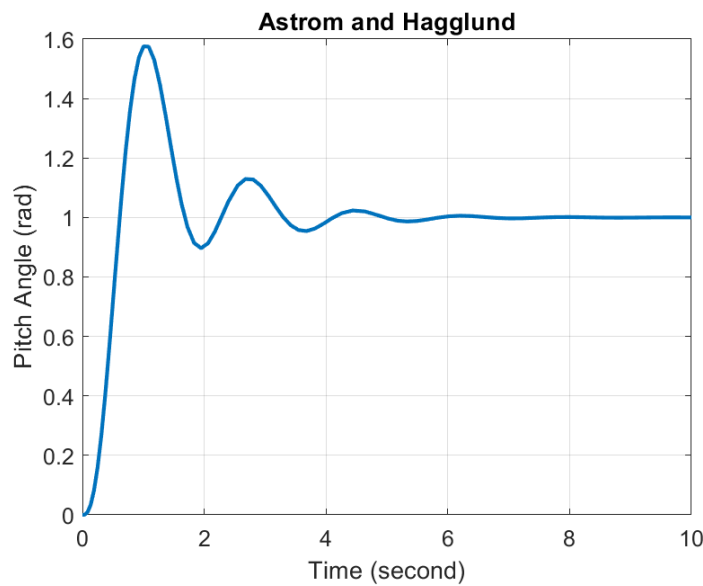


Figure 13
Step Response Graph for Astrom and Hagglund Method



RESULTS

In this study; 4 different methods proposed in the literature for determining PID control coefficients are analyzed. These methods were tested for the pitch angle control of the NAVION aircraft and the results are shown in Figure 13 and the control signals are shown in Figure 14.

When the results of the methods are analyzed, it is seen in Figure 13 that the traditional Ziegler-Nichols (ZN) method gives the fastest response but has the highest overshoot. The modified Ziegler-Nichols (MZN) method reacts slower than ZN, Astrom, and Hagglund (AH) and Tyreus-Luyben (TL) methods, but has less overshoot than ZN and AH methods.

Figure 14 shows that the control signals of the AH, MZN, and TL methods put less load on the motors compared to the conventional ZN method. Therefore, AH, MZN, and TL are the preferred methods for safer and smoother flights.

Figure 14
Step Response Graphs of Controlled Systems

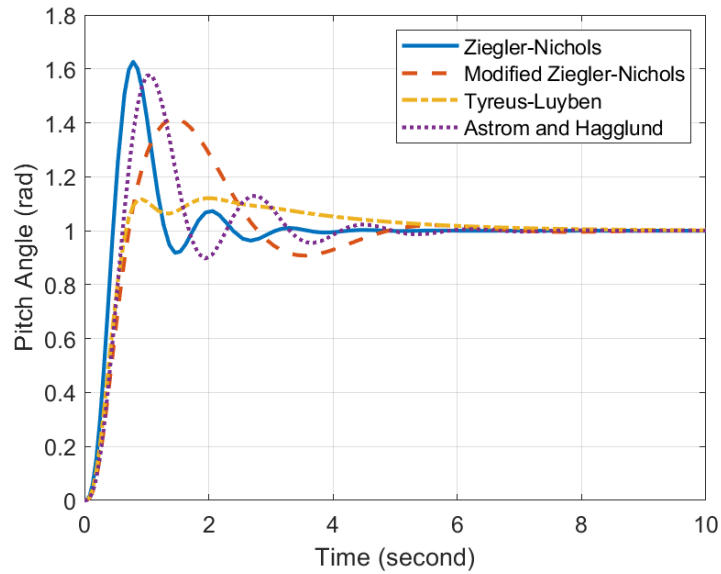
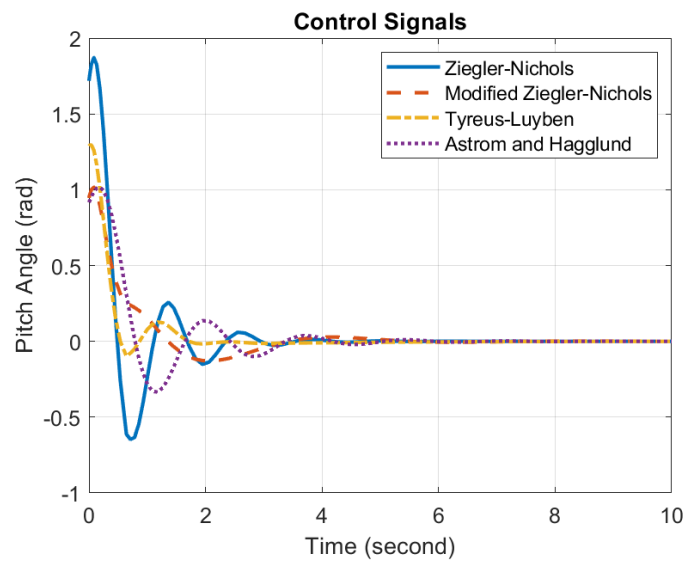


Figure 15
Controller Performance Graphs



Root Mean Square Error (RMSE) shows that all 4 methods give similar results. As can be seen in Table 3, the MZN method has a slightly lower RMSE value than AH and has fewer overshoots. The Tyreus-Luyben method has a lower RMSE and significantly fewer overshoots than the other methods.

Table 3
Parameters Before and After Control

Method	Rising Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	RMSE
Ziegler-Nichols	0.2721	2.8918	62.6723	0.3940
Modified Ziegler-Nichols	0.4448	4.6044	41.3944	0.4111
Tyreus-Luyben	0.4107	5.6356	11.8418	0.3787
Astrom and Hagglund	0.3696	4.6417	57.5490	0.4136

CONCLUSION

When the step responses of the systems are analyzed, it can be said that the control system in which the PID coefficients are determined by the Tyreus-Luyben Method is more efficient since the overshoot is less, the error values are less than the other methods, and the steady state error is eliminated. In addition, when the control signals are analyzed, it is seen that the system is less loaded and the control signal oscillation is less. Since both the control signal and the results are better, Tyreus-Luyben performs better than the other methods.

Ethical Committee Approval

No human or animal subjects requiring ethical committee approval were used in this study. The research was conducted using publicly available data sets, literature reviews, or theoretical analyses. In accordance with ethical rules, full compliance with academic honesty and scientific ethical principles was maintained at every stage of the research process. Therefore, ethical committee approval was not required.

Author Contributions

Research Design (CRediT 1) Muhammet ÖZTÜRK (50%) – Saliha KÖPRÜCÜ (50%)

Veri Toplama (CRediT 2) Saliha KÖPRÜCÜ (60%) – Muhammet ÖZTÜRK (40%)

Research - Data Analysis - Validation (CRediT 3-4-6-11) Saliha KÖPRÜCÜ (80%) – Muhammet ÖZTÜRK (20%)

Writing of the Article (CRediT 12-13) Saliha KÖPRÜCÜ (80%) – Muhammet ÖZTÜRK (20%)

Text Revision and Improvement (CRediT 14) Saliha KÖPRÜCÜ (50%) – Muhammet ÖZTÜRK (50%)

Funding

There is no funding.

Conflict of Interest

There is no conflict of interest.

Sustainable Development Goals (SDG)

Sustainable Development Goals: 9 Industry, innovation and infrastructure

REFERENCES

- Nelson, R. C. (1998). *Flight stability and automatic control* (Vol. 2). New York: WCB/McGraw Hill.
- Keane, J. F., & Carr, S. S. (2013). A brief history of early unmanned aircraft. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 32(3), 558-571.
- Stevens, B. L., Lewis, F. L., & Johnson, E. N. (2015). *Aircraft control and simulation: dynamics, controls design, and autonomous systems*. John Wiley & Sons.
- Ahmed, W., Li, Z., Istan, M., & Anwar, M. B. (2019, August). Multi-objective Eigenstructure Assignment-PID Based Controller Design for Longitudinal Motion of Aircraft. In *2019 5th International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)* (pp. 40-44). IEEE.
- Durmaz, M., Cici, K., Sarıkaya, M., Bilici, M., & Bilgiç, H. H. (2013). Metaheuristic algorithm-based cascade PID controller design for fixed wing unmanned aerial vehicle. *European Mechanical Science*, 7(4), 230-237.
- Ulus, S., & Ikbal, E. (2019). Lateral and longitudinal dynamics control of a fixed wing UAV by using PID controller. In *4th International Conference on Engineering and Natural Sciences*.
- Dhadekar, D. D., & Talole, S. E. (2018). Robust fault tolerant longitudinal aircraft control. *IFAC-PapersOnLine*, 51(1), 604-609.
- Hušek, P., & Narenathreyas, K. (2016). Aircraft longitudinal motion control based on Takagi–Sugeno fuzzy model. *Applied Soft Computing*, 49, 269-278.
- Narenathreyas, K. B. (2013). Fuzzy logic control for aircraft longitudinal motion.
- Öztürk, M., & Özkol, İ. (2021). Comparison of self-tuned Neuro-Fuzzy controllers on 2 DOF helicopter: an application. *SN Applied Sciences*, 3(1), 124.
- Tang, K. S., Man, K. F., Chen, G., & Kwong, S. (2001). An optimal fuzzy PID controller. *IEEE transactions on industrial electronics*, 48(4), 757-765.
- Deepa, S. N., & Sudha, G. (2016). Longitudinal control of aircraft dynamics based on optimization of PID parameters. *Thermophysics and Aeromechanics*, 23(2), 185-194.
- Rosario-Gabriel, I., & Cortés, H. R. (2018, June). Aircraft Longitudinal Control based on the Lanchester's Phugoid Dynamics Model. In *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 924-929). IEEE.

İHA'larda İtki İçin Kullanılan Mikro Turbojet Motorun Hava Kompresörünün Termodinamik Analizi

Ali İSMAYİLLİ¹  Mahmut Sami BÜKER^{2*} 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Geliş Tarihi: 22.03.2024
Kabul Tarihi: 23.05.2024
Yayın Tarihi: 30.06.2024

Anahtar Kelimeler:

İHA,
Mikro Turbojet Motoru,
Hava Kompresörü,
Termodinamik Analiz.

Bu çalışmada, İHA'larda itki için kullanılan küçük ölçekli mikro turbojet motorunun ana bileşenlerinden olan radyal kompresör çarkının HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ve termodinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan mikro turbojet motoru için deniz seviyesi koşulları (101.325 Pa, 288.15 K) referans alınmıştır. Kompresör modelleri 12 tam kanatlı (full blade) olarak tasarlanmıştır. Kompresör modelleri için kanat kalınlıkları 1.3 mm olarak belirlenmiştir. HAD analizleri aynı kütle akış hızları (1 kg/s) ve basınç oranlarına (4.8) göre 45.500, 55.500 ve 65.500 rpm devir hızlarında 3 tasarım için yapılmıştır. Bu koşullar için, enerji verimleri %94.29, %94.44 ve %94.68 olarak ve ekserji verimleri ise sırasıyla %79.25, %86.02 ve %81.70 olarak belirlenmiştir.

Thermodynamic Analysis of An Air Compressor of Micro Turbojet Engines Used for Propulsion in UAVs

Article Info

ABSTRACT

Received: 22.03.2024
Accepted: 23.05.2024
Published: 30.06.2024

Keywords:

UAV,
Micro Turbojet Engines,
Air Compressor,
Thermodynamic Analysis.

In this study, computational fluid dynamics (CFD) and thermodynamic analyses of the radial compressor blade which is one of the key components of the small-scale micro turbojet engine used for propulsion in UAV's, were conducted. The micro turbojet engine was analysed under sea level conditions (101.325 Pa, 288.15 K). The compressor models were designed with 12 full blades, and the blade thickness for the compressor models was set at 1.3 mm. CFD analyses were carried out at three different operating speeds including 45.500, 55.500 and 65.500 rpm, with the same mass flow rates (1 kg/s) and pressure ratios (4.8). The energy efficiencies of these models were determined as 94.29%, 94.44% and 94.68%, then, exergy efficiencies were found to be 79.25%, 86.02% and 81.70%, respectively.

To cite this article:

İsmayilli, A., & Büker, M. S. (2024). İHA'larda itki için kullanılan mikro turbojet motorun hava kompresörünün termodinamik analizi. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(1), 27-43. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.3.3>

*Sorumlu Yazar: Mahmut Sami BÜKER, msbucker@erbakan.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

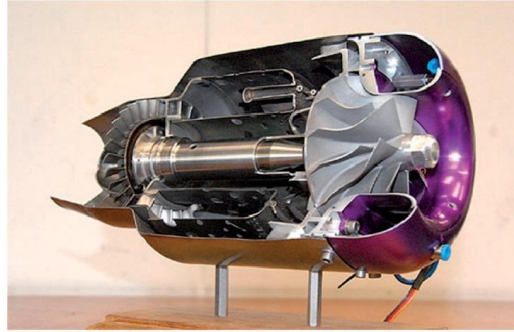
GİRİŞ

Günümüzde küçük gaz türbinli motorlar havacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır. Turbojet ve turbofan motorlar şeklindeki gaz türbinleri, hem yüksek irtifalarda uçuşa hem de yüksek hızlarda yeterli itki gücü sağlama özelliklerine sahiptirler (Daşık, 2020).

Mikro turbojet motorları düşük maliyetli, küçük boyutları ve hafif yapılarıyla öne çıkan içten yanmalı motorlardır. Bu motorlar, hava emme, sıkıştırma, yanma ve çıkış olmak üzere dört temel işlemi gerçekleştirerek itki üretirler (Karaşiray, 2009). Bu motorlarda yakıt olarak ise kerosen kullanılmaktadır (Şekil 1).

Şekil 1

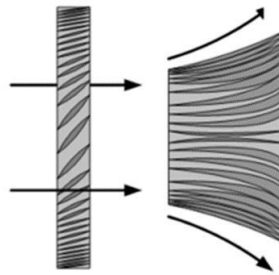
MTJ Motor Yan Kesit Görünümü



Mikro turbojet motorlar, kompresör, yanma odası, türbin ve egzoz nozulu olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır (Şekil 2). Bu motorlarda radyal kompresörler kullanılmaktadır. İlk aşamada hava, kompresörde sıkıştırılır ve yüksek basınçlara çıkarılarak yanma odasına iletilir ve hava-yakıt karışımı yakılarak nozuldaki dışarıya atılır. Bir turbojet motorunun gaz giriş bölgesi ile egzoz ucu bölgesi arasındaki momentum farkı itme kuvveti oluşturur (Yücer, 2018).

Şekil 2

Eksenel ve Radyal Kompresör (Eyüp, 2013)



Santrifüj kompresör çarkının geometrisi, aksiyel kompresör çarkına göre daha basittir. Bu nedenle üretim maliyetleri genellikle daha düşüktür. Özellikle mikro turbojet motor gibi kompakt sistemler için radyal kompresörler, düşük maliyetleri, geniş çalışma aralıkları ve yüksek basınç oranları sağlayabilen iyi bir seçenek olarak kabul edilmektedir (İçke, 2016).

Geçmişten günümüze gaz türbinli motorların performanslarını iyileştirmek için birçok çalışma yapılmıştır. Balli ve ark. (2021) deniz seviyesinde ve 11.000 metre yükseklikte 298 K ve 101.3 kPa da bir Jet A-1 turbojetinin ekserji ve ekserjeoekonomik analizini gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, hava kompresörü, yanma odası, gaz türbini, egzoz gazları ve motorun ekserji verimliliği sırasıyla %81.33, %55.13, %96.05, %88.41 ve %34.84 olmuştur. Liu ve ark. (2016) FV520B paslanmaz çelikten yapılmış

bir hava kompresörünün merkezkaç ve aerodinamik yükleri de hesaba katarak yorulma ömrünü incelemişlerdir. Elde edilen sonuçları doğrulama amacıyla numuneler üzerinde yorulma testleri yapılmıştır. Zengin ve Tokgöz (2022) standart bir turbojet motoru için hava kompresöründen çekilen tahliye havasına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi, itki ve jet çıkış basıncını analitik olarak incelemek amacıyla MATLAB arayüzü geliştirmişlerdir. Sonuçları literatürle karşılaştırmışlar ve maksimum hata oranını yaklaşık olarak % 1.1 bulmuşlardır. Kompresörden çekilen hava miktarı arttıkça motor performansı ve çıkış basıncı düşmüş, buna mukabil özgül yakıt tüketim değeri ise artmıştır. Kocamer ve ark. (2022) insansız hava araçlarında kullanılan iniş takımlarının sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal analizlerini gerçekleştirmişler ve maksimum hafiflikte kompozit bir iniş takımı tasarlamayı amaçlamışlardır. Tasarımlarının uçak iniş yüklerini kırılma olmaksızın başarıyla karşılayabildiği görülmüştür. Dağ ve ark. (2023) maksimum 1000 m irtifaya çıkabilen ve 15 m/s sabit hıza sahip hafif kategoride bir İHA tasarlamışlar ve İHA'nın 15 dk'lık uçuşta gerekli aerodinamik gereksinimleri sağlayabildiğini doğrulamışlardır.

Bu çalışma, mikro turbojet motorlarının önemli bir bileşeni olan radyal hava kompresörlerinin performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, radyal kompresör çarkı için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler ANSYS Workbench platformunda yapılmış ve bu süreçte Vista CCD, BladeGen, TurboGrid ve CFX araçları kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen statik ve toplam basınç, sıcaklık, entalpi, entropi, Mach sayıları, kütle akış hızı, giriş çıkış basınç oranları ve çıkış hızları ele alınarak enerji ve geleneksel ekserji analizleri yapılmıştır. Bu çalışma, mikro turbojet motorlarının radyal hava kompresörlerinin performansını anlamak ve optimize etmek için bir yaklaşım sunmayı amaçlamaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışmada, İHA'larda itki için kullanılan mikro turbojet motoruna ait radyal hava kompresörünün yüksek ve düşük devir hızlarında HAD analizleri gerçekleştirilerek, çıkan sonuçlar için enerji ve geleneksel ekserji analizleri yapılmıştır. Her biri 12 kanata sahip, 3 farklı tam kanatlı radyal kompresör modeli tasarlanmış, analizler sonucunda en iyi model belirlenmiştir. HAD analizleri aynı kütle akış hızları (1 kg/s) ve basınç oranlarına (4.8) göre 45500, 55500 ve 65500 rpm devir hızlarında Ansys Workbench aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Mikro turbojet motorlarda kullanılan kompresörler için normal RPM (dakika başına devir sayısı), özel tasarım ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak değişse de, tipik olarak, mikro turbojet motor kompresörleri, genellikle yaklaşık 50.000 RPM ila 200.000 RPM veya daha yüksek arasında değişen yüksek hızlarda çalışır. Bu yüksek dönme hızları, mikro turbojet motorların kompakt boyut kısıtlamaları dahilinde istenen sıkıştırma oranlarını ve hava akış hızlarını elde etmek için gereklidir (Gua ve ark., 2014).

Radyal (santrifüj) kompresör için ANSYS-VISTA CCD (Centrifugal Compressor Design) kullanılmıştır. Çıkan enerji analizi sonuçlarına göre her sisteme geleneksel ekserji analizi uygulanmıştır ve kompresör ekserji verimlilikleri belirlenmiştir. Çalışmada difüzör kısmı dikkate alınmadan, sadece radyal kompresörün giriş ve çıkışında gerçekleşen değişimler hesaba alınmıştır.

Enerji Analizi

Manyetik ve elektrik tepkilerini göz ardı ettiğimizde, değişim sırasında, sistemin toplam enerjisindeki değişim, iç enerji, kinetik ve potansiyel enerji değişimlerinin toplamından oluşur (Cengel, 2011).

$$\Delta E_{sistem} = \Delta U + \Delta Ke + \Delta Pe \quad (1)$$

Sistemin referans ortama göre hareketi nedeniyle elde ettiği enerjiye kinetik enerji (Ke);

$$Ke = \frac{1}{2}mV^2 \quad (2)$$

Yerçekimi kuvvetine ve enerji akışının referans ortama göre yüksekliğine bağlı olarak sistemin sahip olduğu potansiyel enerji (Pe);

$$Pe = mgz \quad (3)$$

Enerji verimliliği, giriş enerjisi ile çıkış enerjisi arasındaki oranı ifade etmektedir. Verimlilik hesaplamaları için kompresörün giriş ve çıkış noktalarındaki entalpi değerleri bulunmalıdır. Bu çalışmada entalpi değerleri HAD analizleri sonucunda belirlenmiş, enerji verimlilikleri ise aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{\Delta h_2}{\Delta h_1} * 100 \quad (4)$$

Ekserji Analizi

Sistemin toplam ekserjisi, fiziksel, kimyasal, kinetik ve potansiyel ekserjiye ayrılabilir. Bu çalışmada sadece kinetik ve potansiyel ekserji hesaplamaları yapılmış ve aşağıdaki genel denklem kullanılmıştır;

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{kin} + \dot{E}x_{pot} \quad (5)$$

Burada, kinetik ekserji;

$$ex_{kin} = 0,5 * (V_2^2 - V_1^2) \quad (6)$$

Potansiyel ekserji;

$$ex_{pot} = g\Delta h \quad (7)$$

Giriş ekserjisi;

$$Ex_1 = H_1 - T_0 * S_1 \quad (8)$$

Çıkış ekserjisi;

$$Ex_2 = H_2 - T_0 * S_2 \quad (9)$$

Ekserji verimliliğinin hesaplanması;

$$\eta_{ex,comp} = \frac{(Ex_2 - Ex_1)}{W} * 100 \quad (10)$$

Çıkış hızının hesaplanması;

$$V_2 = \sqrt{2 * (H_2 - T_2 * S_2)} \quad (11)$$

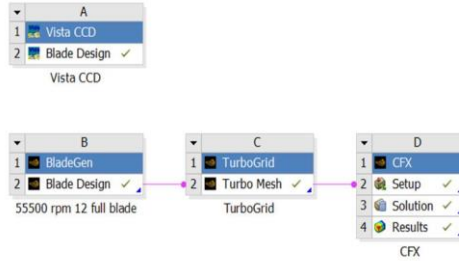
BULGULAR

HAD Analizleri

Çalışma kapsamında, radyal kompresör çarkı için kapsamlı HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler ANSYS platformunda gerçekleştirilmiş ve bu süreçte Vista CCD, BladeGen tasarım araçları, TurboGrid sayısal ağ oluşturma aracı ve HAD çözücüsü olarakta CFX kullanılmıştır (bkz. Şekil 3).

Şekil 3

ANSYS Workbench CFX Proje Şeması



Radyal kompresörü tasarlarken kütleli debi, basınç oranı ve Mach sayısı gibi hususlar dikkate alınmalıdır. Giriş sıcaklığı, giriş basıncı, sıkıştırma oranı ve kütleli debi gibi değerler istenen itkiye göre giriş değerleri olarak belirlenir (Kurt, 2021). Tablo 1’de mevcut çalışma için kompresör giriş parametreleri verilmiştir.

Tablo 1

Kompresör Giriş Parametreleri

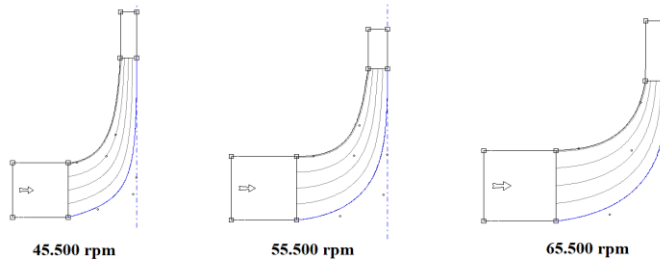
Giriş Basıncı	101.325 Pa
Giriş Sıcaklığı	288.15 K
Basınç Oranı	4.8
Kütle Akış Hızı	1 kg/s
Kompresör Kanat Kalınlığı	1.3 mm
1. Model için Devir Hızı	45.500 RPM
2. Model için Devir Hızı	55.500 RPM
3. Model için Devir Hızı	65.500 RPM

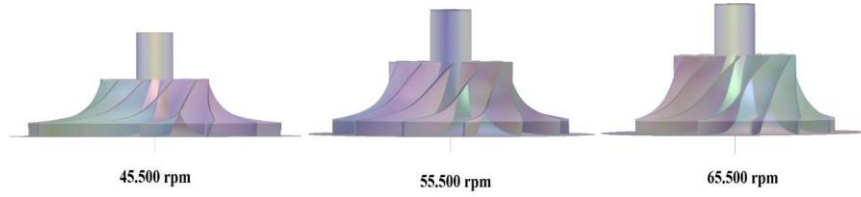
Ön İşleme (Blade Design)

BladeGen, 1B tasarımı yapılmış turbo çarkların üç boyutlu geometrisini oluşturmak üzere özelleşmiş bir turbo çark CAD programıdır. Bu araç, üç boyutlu kompresör kanat profillerinin oluşturulması, hücum ve terk kenarları arasındaki açı dağılımı ve geçişlerinin optimize edilmesini sağlamaktadır. Bu program, karmaşık akışkan etkileşimlerini ve kayıplarını dikkate alarak optimize etmekte ve verimli bir kompresör tasarımına imkan sağlamaktadır. Şekil 4’te kanatların meridyonel görünüşleri ve kompresör modelleri verilmiştir.

Şekil 4

Kanatların Meridyonel Görünüşleri ve Kompresör Modelleri





HAD analizleri, farklı kanat açılarının kompresör performansına etkisini incelemek ve bir boyutlu tasarımın doğrulanması için kullanılmıştır. Bu analizler, optimum kanat açılarının belirlenmesine yardımcı olurken, kompresörün verimliliğini ve performansını artırmayı amaçlamaktadır.

Sonuç olarak, radyal kompresörün kanat açısı dağılımları üzerine yapılan düzenlemeler, akışın daha verimli bir şekilde yönlendirilmesini sağlamış, bu sayede enerji kayıpları minimize edilmiş ve performans artırılmıştır.

Ağ Kurulumu (Turbogrid)

Bu çalışmada, ağ kurulumu için Turbogrid programı kullanılmıştır. İlk adımda “shroud tip” kısmına 0.25 mm değeri girilmiştir. Bu kısım, bıçakların beraber hareketini sağlarken, kompresörde vibrasyon ve gürültüyü azaltır ve aerodinamik kayıpları azaltarak verimi artırır. Ağ boyutları için “genel boyut faktörü” seçilmiştir ve 1 değeri girilmiştir. Tablo 2’de çalışma kapsamında analiz edilen farklı rpm değerleri için ağ detayları verilmiştir. Şekil 5’te ise ağ örneği gösterilmiştir.

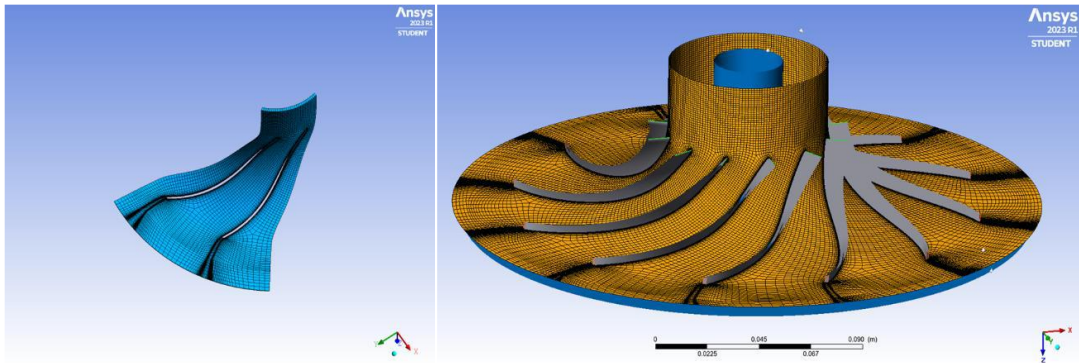
Tablo 2

Kompresör Ağ Detayları

45.500 rpm	197.227 element	213.668 düğüm sayısı
55.500 rpm	201.180 element	185.716 düğüm sayısı
65.500 rpm	224.282 element	241.740 düğüm sayısı

Şekil 5

TurboMesh – Ağ Oluşturma



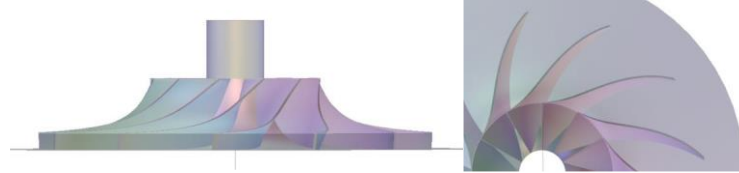
Bu çalışmadaki ağ eleman sayısı 200.000 ve 250.000 arasında oluşturulmuştur. Tam kanatlı kompresör tasarımı yarı kanatlı kompresörlere göre daha az detay ve ayrıntı içermektedir. Daha küçük elemanlara bölünerek sıkı bir eleman ağının oluşturulması, gerçekleştirilecek analizlerin doğruluğunu arttırmak amaçlıdır. Bilgisayar donanımının yeterli seviyede olması, daha küçük elemanlara bölünmüş geometrinin daha yüksek kesinlikli sonuçların elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

45.500 rpm Devir Hızında HAD Analiz Sonuçları

Şekil 6'da modelin yandan ve üstten görseli incelenerek görsel açıklamaları yapılmıştır. Kompresör özet verileri tablosu, statik basınç dağılımı ve sıcaklık dağılımı (kanattan kanada) değerlendirilmiş, ayrıca Mach sayıları ve hız vektörleri (kanattan kanada) analiz edilmiştir. Kompresörün enerji dönüşüm verimliliğini yansıtan performans sonuçları tablosu da sunularak analiz tamamlanmıştır.

Şekil 6

Modelin Yandan ve Üstten Görünümü



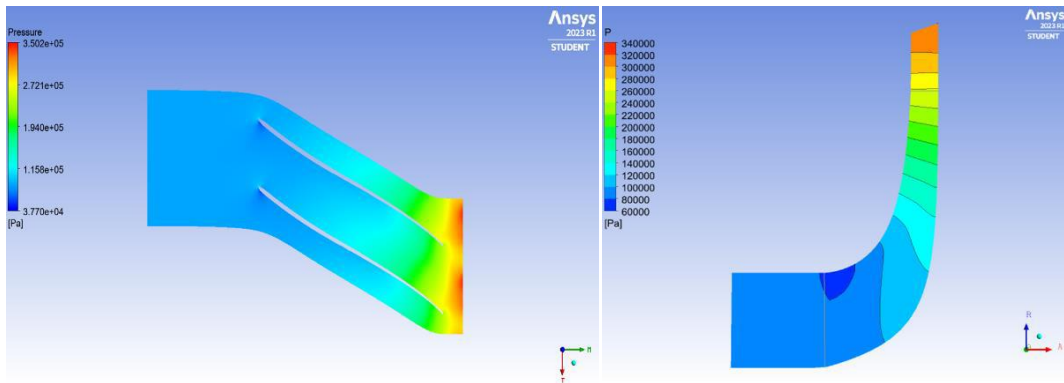
Tablo 3

Kompresör Özet Verileri (45.500 rpm)

	Kompresör Girişi	Kompresör Çıkışı
P_{statik}	86.051 [Pa]	317.267 [Pa]
P_{toplam}	101.319 [Pa]	463.395 [Pa]
T_{statik}	275.007 [K]	415.453 [K]
T_{toplam}	288.15 [K]	463.062 [K]
Entalpi [h]	10.0381	165.683
Entropi [s]	-34.22	6.474
Mach sayısı	0.6811	0.7143

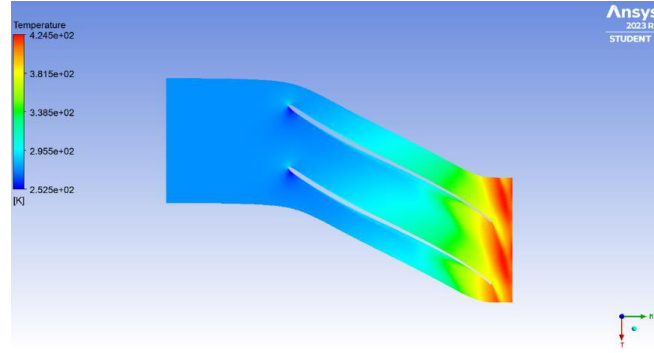
Şekil 7

Statik Basınç Dağılımı a) Kanattan Kanada, b) Meridyonel



Şekil 8

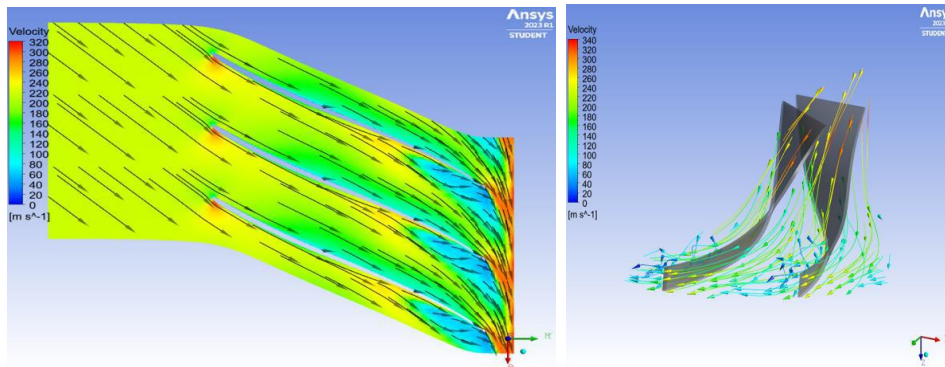
Sıcaklık Dağılımı (Kanattan Kanada)



Entalpi değerleri incelendiğinde, giriş entalpi değeri 10.0381 iken çıkış entalpi değeri 165.683 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, hava akışının kompresör içerisinde enerji kazandığını ve ısınarak çıkışa ilerlediğini göstermektedir. Entropi değerleri de benzer şekilde analiz edilmiştir. Girişteki entropi değeri -34.2272 iken çıkıştaki entropi değeri 6.474 olarak tespit edilmiştir. Entropi değerleri arasındaki bu fark, kompresör içindeki hava akışının başlangıçta düzenli olmayan bir yapıya sahip olduğunu, ancak kompresörün bu düzensizliği sıkıştırma sürecinde kısmen azalttığını ve enerji kazandırdığını göstermektedir.

Şekil 9

Hız Vektörleri a) Kanattan Kanada, b) 3D



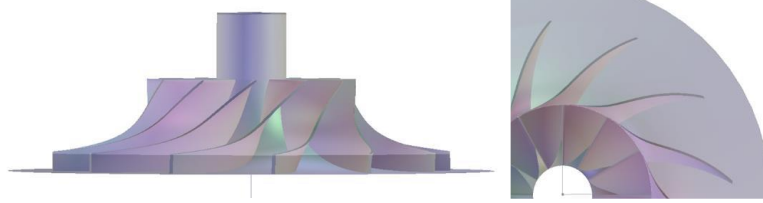
Şekil 9 incelendiğinde, hız vektörlerinde herhangi bir kırılma, geri sapma veya kopma gözlemlenmemiştir. Bu durum, akışın düzgün bir şekilde hareket ettiğini göstermektedir. Hız vektörlerindeki bu süreklilik, analiz sürecinin tutarlı sonuçlar ürettiğini, elde edilen bu kesintisiz hız dağılımlarına göre, kompresörün iç akış özelliklerinin başarılı bir şekilde değerlendirildiğini ve tasarımın istenilen performansı sergilediğini göstermektedir. Yapılan hesaplamalardan bu kompresör için çıkış hızı 150.95 m/s olarak hesaplanmıştır.

55.500 rpm Devir Hızında HAD Analiz Sonuçları

Bu kısımda, mikro turbojet motorunun 55.500 rpm devir hızında en verimli ($\eta_{enerji} = \%94.44$, $\eta_{ekserji} = \%86.02$) şekilde çalışan radyal kompresör modelinin HAD analiz sonuçları verilmiştir (Şekil 10).

Şekil 10

Modelin Yandan ve Üstten Görünümü

**Tablo 4**

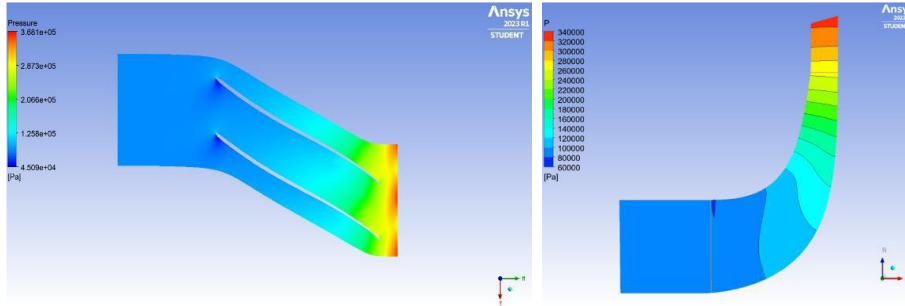
Kompresör Özet Verileri (55.500 rpm)

	Kompresör Girişi	Kompresör Çıkışı
P_{statik}	85.986 [Pa]	325.666 [Pa]
P_{toplaml}	101.318 [Pa]	482.009 [Pa]
T_{statik}	274.951 [K]	418.134 [K]
T_{toplaml}	288.15 [K]	468.514 [K]
Entalpi (h)	10.0351	171.114
Entropi (s)	-34.21	7.9606
Mach sayısı	0.7559	0.7538

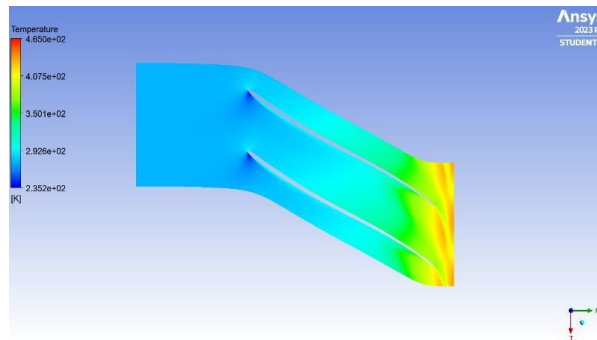
Kompresör özet verileri incelendiğinde, çıkış basınç değeri 482.009 Pa olarak hesaplanmıştır (Şekil 11). Çıkış sıcaklık değeri ise 468.514 K olarak hesaplanmıştır (Şekil 12).

Şekil 11

Statik Basınç Dağılımı a) Kanattan Kanada, b) Meridyonel

**Şekil 12**

Sıcaklık Dağılımı (Kanattan Kanada)

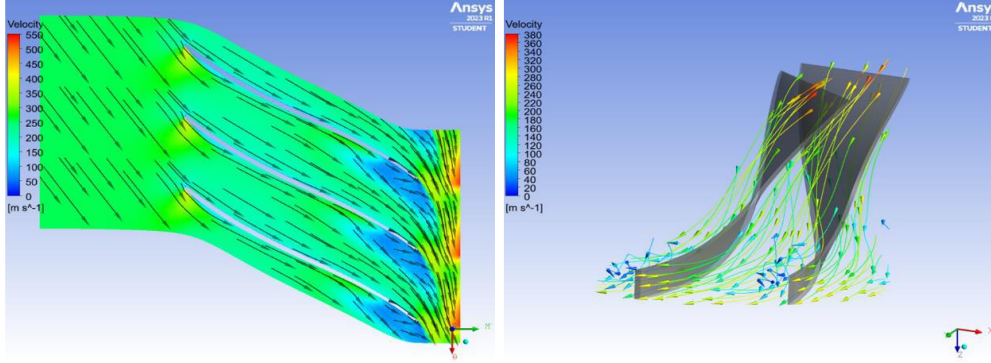


Kompresör performansının karşılaştırmalı analizi, önemli bilgileri ortaya koymaktadır. Bu

çalışma kapsamında yapılan kompresörün politropik verimliliği %89.586 ve izentropik verimliliği ise %91.5315 olarak bulunmuştur. (Chaudhary, 2018) tarafından gerçekleştirilen HAD analizi sonuçlarına göre, izentropik verimlilik %83 olarak elde edilmiştir. Karşılaştırmalı analiz, kompresörün farklı çalışma koşullarında ve tasarım seçeneklerinde nasıl davrandığının daha bütünsel bir şekilde anlaşılmasını sağlamaktadır.

Şekil 13

Hız Vektörleri a) Kanattan Kanada, b) 3D



3D ve kanattan kanada hız vektörlerinin akış yönünde kesintisiz ve kırılma olmaksızın ilerlediği gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar, hava akışının kompresör içinde istikrarlı ve kontrollü bir şekilde ilerlediğini, akışın herhangi bir geri sıçrama veya kırılma olmadan başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Aynı zamanda, bu kompresör için yapılan hesaplamalardan sonra kompresör çıkış hızı 174.16 m/s olarak hesaplanmıştır (Şekil 13).

Tablo 5

Kompresör Performans Sonuçları

Kütle akış hızı	1.0028 kg/s
Toplam basınç oranı	4.7574
Toplam sıcaklık oranı	1.6259 K
Toplam izantropik verimlilik	%91.4774
Toplam politropik verimlilik	%89.4524

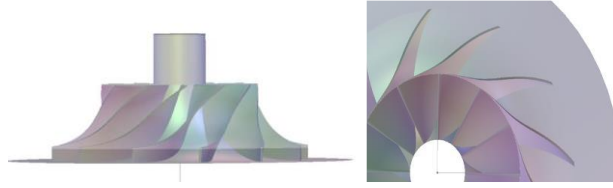
Tablo 5'te verilen kompresör performans sonuçlarına baktığımızda, kütle akış hızının 1.0028 kg/s olduğu görülmektedir. Bu sonuç, tasarım amaçlarına uygun bir şekilde hedeflenen kütle akış hızına eşit olduğunu göstermektedir. Toplam basınç oranı 4.7574 olarak hesaplanmıştır. Bu hedeflenen basınç oranının (4.8) altında olduğunu ve bu analizin doğru bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

65.500 rpm Devir Hızında HAD Analiz Sonuçları

Son olarak, bu bölümde 65.500 rpm devir hızına sahip kompresör modelinin HAD sonuçları yer almaktadır. Görüldüğü üzere bu model diğerlerine nazaran daha iri bir geometriye sahiptir (Şekil 14). Bu durum, analiz sürecini daha karmaşık hale getiren bir etken olarak ortaya çıkmaktadır.

Şekil 14

Modelin Yandan ve Üstten Görşeli



Tablo 6'da modelin temel özet verileri yer almaktadır.

Tablo 6

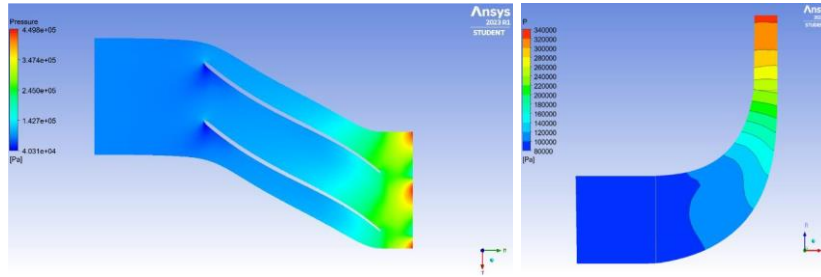
Kompresör Özet Verileri (65.500 rpm)

	Kompresör Girişi	Kompresör Çıkışı
P_{statik}	89003.6 [Pa]	324.617 [Pa]
P_{toplam}	101.373 [Pa]	465.335 [Pa]
T_{statik}	277.6 [K]	428.15 [K]
T_{toplam}	288.15 [K]	477.1 [K]
Entalpi (h)	10.032	179.744
Entropi (s)	-34.2	50.8
Mach sayısı	0.8	1.0399

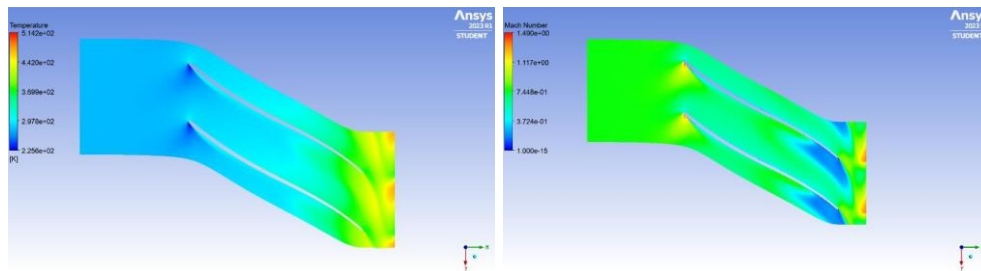
Gerçekleştirilen analiz sonucunda kompresörün çıkışında toplam basınç oranı 465.335 Pa değerine yükselmiştir (Şekil 15). Yine aynı şekilde toplam basınçtaki bu artış, kompresörün verimli bir şekilde çalıştığını ve akışkanı yüksek basınçlara sıkıştırdığını göstermektedir.

Şekil 15

Statik Basınç Dağılımı a) Kanattan Kanada, b) Meridyonel

**Şekil 16**

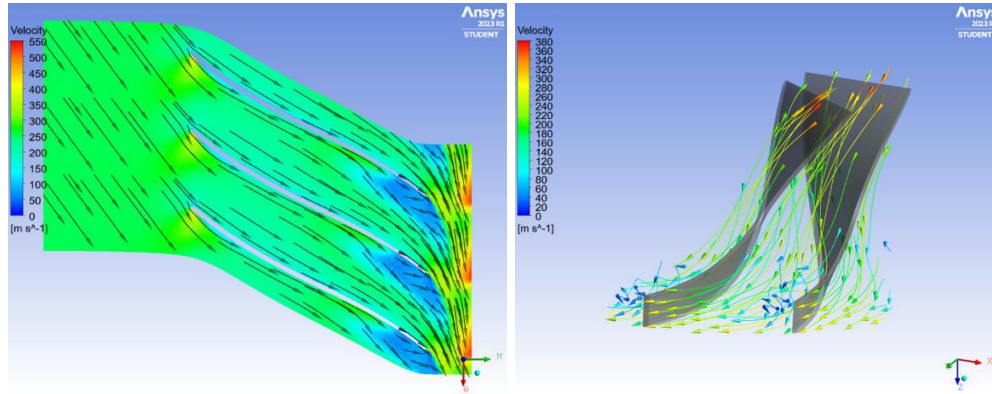
a) Sıcaklık Dağılımı, b) Mach Sayısı (Kanattan Kanada)



Analiz sonucunda 65.500 rpm devir hızına sahip kompresörün giriş ve çıkış Mach sayıları sırasıyla 0.4352 ve 0.7269 olarak belirlenmiştir. Değerlerden anlaşıldığı üzere, kompresörün çalışma sürecinde hava akışını hızlandırdığı görülmektedir (Şekil 16).

Şekil 17

Hız Vektörleri a) Kanattan Kanada, b) 3D



Şekil 17’de 65.500 rpm devir hızı için hız vektörleri incelendiğinde, ciddi bir kırılma veya geri sıçrama tespit edilmemiştir. Yapılan analizlerde en çok hata bu kompresör modelinde alınmış, gerekli iyileştirmelerden sonra olumlu sonuçlara varılmıştır. Bu model için yapılan hesaplamalardan sonra kompresör çıkış hızı 210.54 m/s olarak hesaplanmıştır.

Enerji-Ekserji Analiz Sonuçları

Her üç sisteme enerji - ekserji analizleri uygulanmıştır. Hesaplamalar, giriş-çıkış entropileri, entalpileri, basınçları ve sıcaklıkları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7

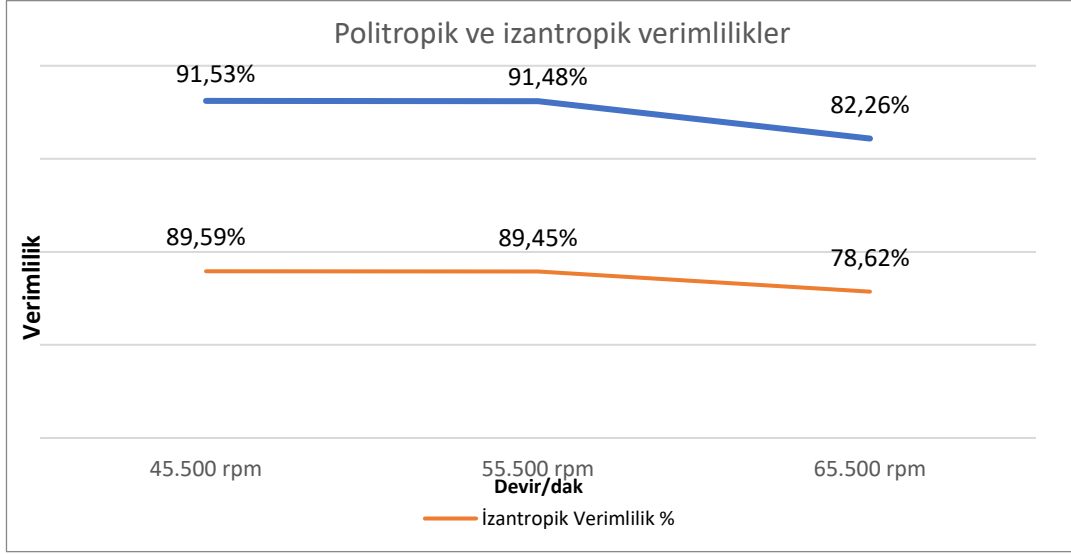
Enerji-Ekserji Sonuç Tablosu

	45.500 rpm	55.500 rpm	65.500 rpm	
Giriş Ekserjisi	-9.3891	-8.7151	-8.7588	Ex_1
Çıkış Ekserjisi	163.03	169.06	164.6	Ex_2
Toplam İzantropik Verimlilik	%91.5315	%91.4774	%82.2556	$\eta_{izantropik}$
Toplam Politropik Verimlilik	%89.586	%89.4524	%78.6226	$\eta_{politropik}$
Kompresör İşi	11852.38	10167.41	10192.74	W
Çıkış Hızı	150.95	174.16	210.54	V_2
Kinetik Ekserji	11.39802	15.12916	22.13306	$Ex_{kinetik}$
Potansiyel Ekserji	2.66692	2.6491	2.8798	$Ex_{potansiyel}$
Toplam Ekserji	14.0649	17.7783	25.0128	Ex_{toplam}
Enerji Verimliliği	%94.29	%94.44	%94.68	η_{enerji}
Ekserji Verimliliği	%79.25	%86.02	%81.70	$\eta_{ekserji}$

Tablo 7’de verilen sonuçlar, farklı devir hızlarına sahip üç kompresör çarkının performansını detaylı bir şekilde göstermektedir. Bu verilere göre, 45.500 rpm devir hızına sahip kompresör çarkının toplam izentropik verimliliği %91.5315, toplam politropik verimliliği ise %89.586 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde, 55.500 rpm devir hızında çalışan kompresörde toplam izentropik verimlilik %91.4774 ve toplam politropik verimlilik ise %89.4524 olarak belirlenmiştir. Diğer yandan, 65.500 rpm devir hızındaki kompresörün toplam izentropik verimliliği %82.2556, toplam politropik verimliliği ise %78.6226 olarak tespit edilmiştir.

Şekil 18

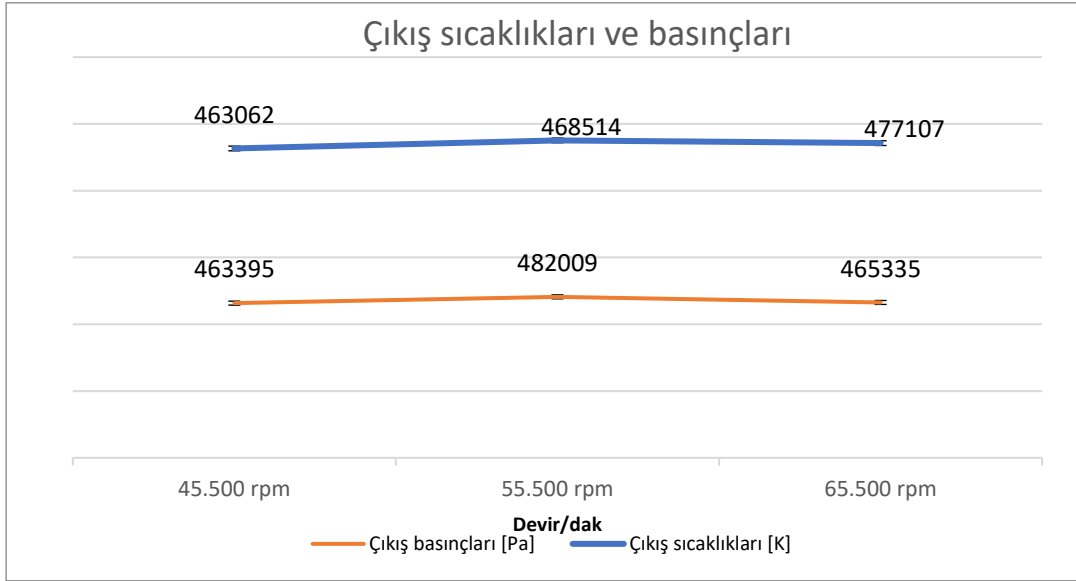
İzentropik ve Politropik Verimlilikler



Bu sonuçlar (Şekil 18), kompresörlerin farklı devir hızlarında farklı performans gösterdiğini ve devir hızının verimlilik üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu göstermektedir.

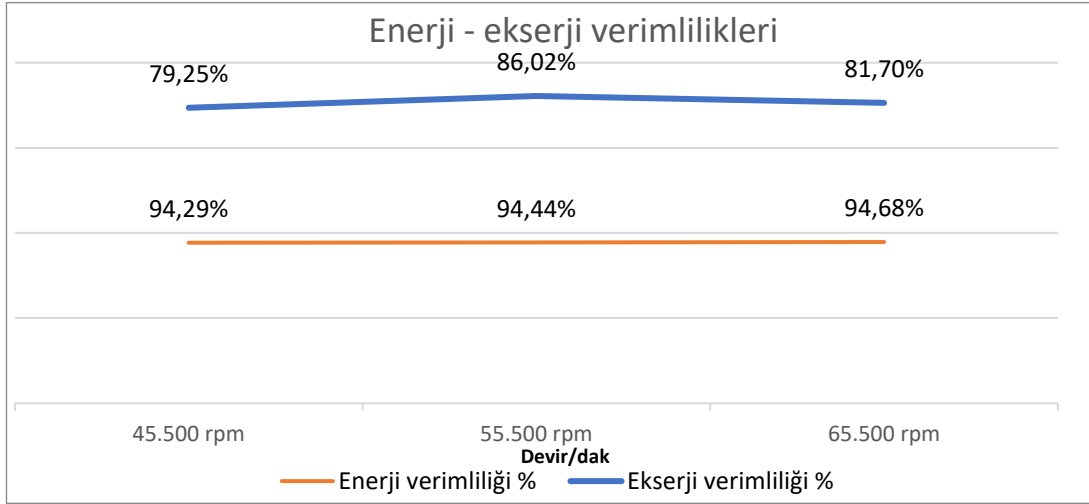
Şekil 19

Çıkış Sıcaklıkları ve Çıkış Basınçları



Her üç kompresörde, kompresör devir hızının artmasıyla çıkış hızı da yükselmiştir. 55.500 rpm devir hızında, enerji verimliliği %94.44, ekserji verimliliği ise %86.02 olarak belirlenmiştir. Diğer iki devir hızına göre daha yüksek verimlilik değerleri, 55.500 rpm devir hızındaki kompresörün daha etkin bir enerji dönüşümü sağladığını göstermektedir (Şekil 19).

Enerji ve ekserji sonuç tablosu incelendiğinde, 55.500 rpm devir hızına sahip kompresörün en verimli performans değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu devir hızında elde edilen yüksek verimlilik değerleri, kompresör tasarımının ve performansının optimize edildiğini göstermektedir. Her üç kompresör modeli için giriş çıkış basınçları, sıcaklıkları, çıkış hızları, entalpileri ve entropileri için, ayrıca enerji ekserji, izentropik ve politropik verimlilik sonuçları özet olarak Şekil 20'de verilmiştir.

Şekil 20**Enerji – Ekserji Verimlilikleri**

Enerji verimliliği açısından, en yüksek enerji verimliliği değeri %94.68 ile 65.500 rpm devir hızında çalışan kompresörde elde edilmiştir. Bu, kompresörün girdi olarak aldığı enerjinin büyük bir kısmını istenilen çıkış işine dönüştürebildiğini ve enerji kayıplarının daha az olduğunu göstermektedir. Ekserji verimliliği açısından en yüksek değeri ise %86.02 ile 55.500 rpm devir hızında çalışan kompresör modeli elde etmiştir.

TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİ

Bu çalışmada, İnsansız Hava Araçlarında (İHA) kullanılan mikro turbojet motorun tam kanat (full blade) radyal hava kompresörünün performansı, farklı devir hızlarında (45.500 rpm, 55.500 rpm ve 65.500 rpm) HAD analizleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, hem kanattan kanada hem de meridyonel düzlemde olmak üzere 3D görsellerle ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

Yapılan HAD analizleri sonucunda elde edilen hız vektörü görselleri, kanattan kanada ve üç boyutlu olarak sunulmuştur. Her üç kompresörde de görsellerdeki hız vektörlerinde herhangi bir kırılma, geri sapma veya kopma gözlemlenmemiştir. Bu durum, akışların düzgün bir şekilde hareket ettiğini göstermektedir. Hız vektörleri görsellerindeki bu süreklilik, analiz sürecinin sağlam sonuçlar ürettiğini, elde edilen bu kesintisiz hız dağılımları, kompresörün iç akış özelliklerinin başarılı bir şekilde değerlendirildiğini ve tasarımın istenilen performansı sergilediğini göstermektedir.

Elde edilen basınç dağılımı görselleri, kanattan kanada olarak sunulmuştur. Görsellerdeki veriler, farklı rotor hızlarına sahip kompresör modellerinin basınç dağılımlarını göstermektedir. Analiz sonucunda 45.500 rpm'de çalışan kompresörde basınç, 463.395 Pa, 55.500 rpm'de çalışan kompresör 482.009 Pa, 65.500 rpm'de çalışan kompresörde basınç 465.335 Pa seviyelerine yükselmiştir. Bu sonuçlar, rotor hızının basınç dağılımı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Analiz sonuçlarının ardından, her üç analiz için enerji ekserji verimlilik analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlara göre enerji verimlilikleri sırasıyla %94.29, %94.44, %94.68, ekserji verimlilikleri ise %79.25, %86.02 ve %81.70 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, farklı devir hızlarının radyal hava kompresörünün performansına nasıl etki ettiğini göstermektedir.

Analiz sonuçlarına göre, ekserji verimliliği açısından en yüksek değere sahip kompresör %86.02 ile 55.500 rpm devir hızında bulunmaktadır. Ancak enerji verimliliği açısından tüm dönme hızlarında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu, enerji verimliliğinin ekserji verimliliğine kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum, enerji kayıplarının ekserji analizi ile ortaya çıktığını gösterirken,

enerji analizi sonuçlarıyla uyumlu olarak ekserji verimliliğinin daha düşük olduğunu göstermektedir.

Yapılan analiz sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı görselleri sunulmuş ve incelenmiştir. Bu görseller, radyal hava kompresörünün farklı devir hızlarında nasıl performans gösterdiğine dair bilgiler sunmaktadır. 45.500 rpm'de çalışan kompresörde sıcaklık dağılımı, 463.062 K olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, 55.500 rpm'de çalışan kompresörde sıcaklık değeri 468.514 K seviyesine yükselmektedir. Yine, 65.500 rpm'de çalışan kompresörde sıcaklık 477.107 K olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlardan, devir hızının radyal hava kompresörünün içindeki akışkanın sıcaklık dağılımına nasıl etki ettiği görülebilmektedir. Daha yüksek devir hızlarında, sıcaklık genellikle artış göstermektedir, bu da daha yüksek enerji dönüşümleri ve daha fazla sürtünme kaynaklı ısı üretimi olduğunu göstermektedir.

Bütün verilere dayanarak, 55.500 rpm devir hızındaki modelin daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir. Sonuç olarak, 55.500 rpm devir hızında çalışan radyal kompresörün analizi, tasarım amaçlarına genel olarak yaklaştığını göstermektedir. Kompresörün performans sonuçları, kütle akış hızı ve basınç oranı açısından olumlu sonuçlar sunarken, Mach sayılarındaki değerler de kompresörün istikrarlı çalışmasını yansıtmaktadır. Bu veriler, kompresörün etkili bir şekilde çalıştığını ve tasarımın başarılı olduğunu göstererek, ileriye yönelik tasarım iyileştirmeleri için bilgiler sunmaktadır.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışmada etik kurul onayı gerektiren insan veya hayvan denekleri kullanılmamıştır. Araştırma, kamuya açık veri setleri, literatür taramaları veya teorik analizler üzerinden yürütülmüştür. Etik kurallar gereği, araştırma sürecinin her aşamasında akademik dürüstlük ve bilimsel etik kurallara tam uyum sağlanmıştır. Bu nedenle, etik kurul onayı gerekmemiştir.

Yazar Katkıları

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) Ali ISMAYILLI (%40) – Mahmut Sami BÜKER (%60)

Veri Toplama (CRediT 2) Ali ISMAYILLI (%80) – Mahmut Sami BÜKER (%20)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Ali ISMAYILLI (%70) – Mahmut Sami BÜKER (%30)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Ali ISMAYILLI (%100)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Mahmut Sami BÜKER (%100)

Finansman

Bu çalışmada finansal destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: Desteklemiyor

REFERANSLAR

- Balli, O., Dalkıran, A., & Karakoç, T. H. (2021). Energetic, exergetic, exergoeconomic, environmental (4E) and sustainability performances of an unmanned aerial vehicle micro turbojet engine. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 93(7), 1254-1275.
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M. 2011, Thermodynamics: an engineering approach (Vol. 5, p. 445). New York: McGraw-hill.
- Chaudhary, A., Trivedi, Y., Mulchand, A., Chauhan, H., Dave, P., Patel, J., & Mehta, V. 2018, Design and CFD analysis of centrifugal compressor and turbine for supercritical CO2 power cycle. In The 6th International Symposium-Supercritical CO2 Power Cycles.
- Dağ, T., Ünler, T., & Uyaner, M., (2023). Elektrikli İnsansız Hava Aracının Maksimum Menzil Hesabı. *Aerospace Research Letters (ASREL) Dergisi*, 2(1), 10-18.
- Daşık, E., 2020, İHA'lar için kullanılacak olan bir turbojet motorun termodinamik çevrim analizi. Yüksek Lisans Tezi, Milli Savunma Üniversitesi, Hezarfen Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul.
- Guo, S., Duan, F., Tang, H., Lim, S. C., & Yip, M. S. (2014). Multi-objective optimization for centrifugal compressor of mini turbojet engine. *Aerospace Science and Technology*, 39, 414-425.
- İçke, R. Ö., 2016, Bir mikro turbojet motorun ters mühendislik ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Karaşıray, N. C., 2009, Türk savunma sanayii'nde İHA'ların uçuşa elverişliliği ve tip sertifikasyonu gerekliliğinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, *Kara Harp Okulu Komutanlığı*, Ankara.
- Kocamer, A., Uzun, M., & Çoban, S. Static Analysis and Design of Fixed-Wing Tactical Unmanned Aerial Vehicle (TUAV) Retractable Main Landing Gear. *ASREL*, 125.
- Kurt, K., 2021, *Radial Compressor Analysis Using CFD for a Micro-Jet*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Liu, S., Liu, C., Hu, Y., Gao, S., Wang, Y., & Zhang, H., 2016, Fatigue life assessment of centrifugal compressor impeller based on FEA, *Engineering Failure Analysis*, 60, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.035>.
- Yücer, C. T., 2016, Thermodynamic analysis of the part load performance for a small scale gas turbine jet engine by using exergy analysis method, *Energy*, 111, 251-259.
- Zengin, Y., & Tokgöz, S. Tahliye Havaasının Turbojet Performansına Etkisi. *ASREL*, 37.

EXTENDED ABSTRACT

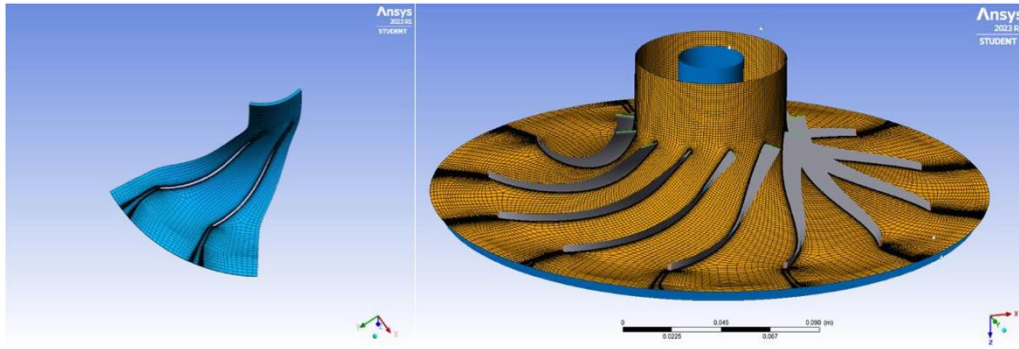


Figure 1. Meshing with TurboMesh

Purpose: This study aims to evaluate the performance of radial air compressors which is one of the main components of the small-scale micro turbojet engine used for propulsion in UAVs. It also aims to present an approach to understand and optimise the performance of radial air compressors of micro turbojet engines.

Theory and Methods: The micro turbojet engine was analysed under sea level conditions (101.325 Pa, 288.15 K). The compressor models were designed with 12 full blades, and the blade thickness for the compressor models was set at 1.3 mm. CFD analyses were performed for the same mass flow rates (1 kg/s) and pressure ratios (4.8) at 45,500, 55,500 and 65,500 rpm. Energy and conventional exergy analyses were performed by considering the static and total pressure, temperature, enthalpy, entropy, Mach number, mass flow rate, inlet and outlet pressure ratios and outlet velocities obtained as a result of these analyses. In the study, only the changes in the inlet and outlet of the radial compressor are taken into account without considering the diffuser part.

Results: The energy efficiencies of the compressor models were determined as 94.29%, 94.44% and 94.68%. The energy efficiencies of these models were determined, followed by traditional exergy analyses, resulting in exergy efficiencies of 79.25%, 86.02% and 81.70% respectively.

Conclusion: It was determined that at 55,500 rpm the model exhibited the best performance for the given data. In conclusion, the analysis of the radial compressor operating at 55,500 rpm shows that the design objectives are generally achieved. The performance results of the compressor show favourable results in terms of mass flow rate and pressure ratio, while the Mach number values reflect the stable operation of the compressor. These data show that the compressor is operating effectively and the design is successful, providing information for future design improvements.

Türkiye ve G-20 Ülkelerinin Havacılık Sektöründe Etkinlik Analizi

Serkan TUNÇ^{1*} Abdullah GÖK¹ Ahmet VURAL¹ Muhammed Emre SARIKAYA¹ Ali Arda KARAASLAN¹ Beyzanur ÇAYIR ERVURAL¹

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Yönetimi, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Geliş Tarihi: 16.02.2024
Kabul Tarihi: 12.05.2024
Yayın Tarihi: 30.06.2024

Anahtar Kelimeler:

G20 ülkeleri,
Türkiye,
Etkinlik analizi,
Havacılık sektörü,
Veri zarflama analizi.

Hava taşımacılığı, taşıma mekanizmasının önemli ayaklarından biridir. Havacılık sektörü, ülkelerin stratejik çıkarlarına askeri, siyasi ve ekonomik üstünlük sağlaması nedeniyle en temel ve birincil çalışma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Sektörde söz sahibi olan ülkeler çağın ve geleceğin gerekliliklerine proaktif olarak kendilerini hazırlamakta ve çalışmalarını bu doğrultuda yürütmektedirler. Bu çalışmaların nedeni ise sürekli artan ekonomik rekabette üstünlük elde etmek ve havacılık alanında ülkenin marka değerini yükseltmek arzusu olarak gösterilmektedir. G20 ülkeleri dünyanın önde gelen ve güçlü ekonomileridir. Bu ekonomik güç içinde havacılık sektörünün payı oldukça fazladır. Bu çalışmanın amacı G20 ülkeleri ve Türkiye'nin havacılık alanında operasyonel ve finansal açıdan etkinlik düzeylerinin belirlenmesidir. Hava sahasının barındırdığı kendi içindeki dinamiklerini değerlendirerek, hem gelişen teknoloji ve küreselleşmenin etkisi hem de özellikle COVID-19 salgının getirmiş olduğu bazı negatif değişiklikler analiz edilerek Türkiye'nin havacılık sektöründe G20 ülkeleri karşısındaki eksiklikleri değerlendirilmektedir. Veri zarflama analizi (VZA) yöntemi kullanılarak doğru ve güvenilir sonuçlar ışığında Türkiye'nin havacılık sektöründe G20 ülkeleri karşısındaki konumu analitik ve objektif yöntemlere dayalı yaklaşımlarla değerlendirilmekte ve eksik olduğu konular belirlenerek kendisini dünya havacılık sıralamasında nasıl daha yüksek konuma çıkarabileceği ele alınmıştır. Bu konuda çalışan araştırmacılara faydalı olacağı düşünülmektedir.

Efficiency Analysis of Turkey and G-20 Countries in Aviation Sector

Article Info

ABSTRACT

Received: 16.02.2024
Accepted: 12.05.2024
Published: 30.06.2024

Keywords:

G20 countries,
Turkey,
Efficiency analysis,
Aviation sector,
DEA

Air transport is one of the important pillars of the transport mechanism. The aviation sector is the most fundamental and primary field of endeavor as it provides military, political and economic superiority to the strategic interests of countries. Countries that have a say in the sector proactively prepare themselves for the requirements of the era and the future and carry out their activities in this direction. The reason for these studies is shown as the desire to gain superiority in the ever-increasing economic competition and to increase the brand value of the country in the field of aviation. G20 countries are the world's leading and powerful economies. The share of the aviation sector in this economic power is quite high. The aim of this study is to determine the operational and financial efficiency levels of G20 countries and Turkey in the field of aviation. By evaluating the internal dynamics of the airspace, the deficiencies of Turkey in the aviation sector against the G20 countries are evaluated by analyzing both the impact of developing technology and globalization and some negative changes brought about by the COVID-19 pandemic. Using the data envelopment analysis (DEA) method, in the light of accurate and reliable results, Turkey's position in the aviation sector against the G20 countries is evaluated with approaches based on analytical and objective methods, and how it can raise itself to a higher position in the world aviation ranking by identifying the issues it lacks. It is expected to be useful for researchers working on this subject.

To cite this article:

Tunç S., Gök, A., Vural, A., Sarıkaya, M. E., Karaaslan, A. A., & Çayır Ervural B. (2024). Türkiye ve G-20 ülkelerinin havacılık sektöründe etkinlik analizi. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(1), 44-68. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.3.2>

*Sorumlu Yazar: Beyzanur Çayır Ervural, bc.ervural@erbakan.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ

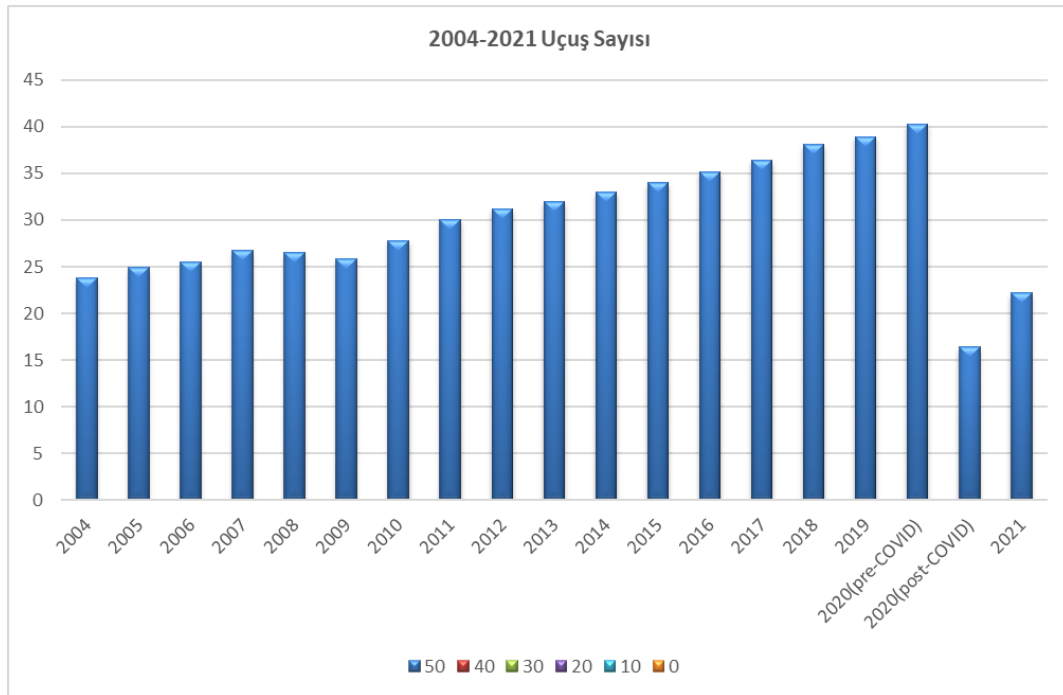
Ulaştırma sektörü, ülkelerin kalkınmasında rol oynayan en önemli ekonomik güç göstergelerinden biridir (Eski ve Tassus, 2018). Her geçen gün küreselleşme ile birlikte teknolojinin de sürekli olarak gelişmesine paralel olarak değişimlere hızlı ayak uydurabilme kabiliyeti, piyasada devam edebilmek için önemli kriterlerden biri olmuştur (Camelia ve Mihai,2008).

G-20 ülkeleri, havacılık alanında lider havayolu şirketlerine ve üst düzey teknolojiye sahip olsalar da Türkiye, özellikle son yıllarda havacılık sektöründe önemli atılımlar yapmış ve hatta bazı G-20 ülkelerini bu konuda geride bırakmayı başarmıştır (DHMI, 2020).

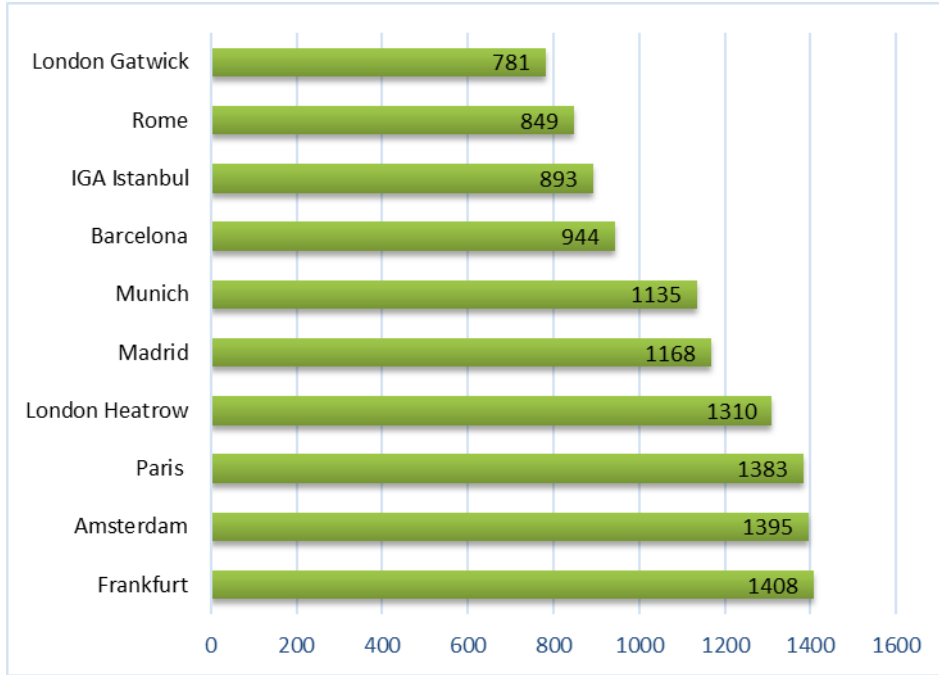
Türkiye havacılık sektöründe çok önemli bir konuma sahiptir. Türkiye konumu itibariyle Asya ile Avrupa'yı birbirine bağlayan bir köprü görevi üstlenmektedir. Günümüzde en çok tercih edilen ulaşım aracının havayolu olması, Türkiye'nin bu sektörde her zaman sektörün gereksinimlerini karşılaması gerektiğini göstermektedir. Örneğin, 2020 yılı sonu düşünüldüğünde İstanbul Havalimanı; Londra Heathrow Havalimanı ve Frankfurt Havalimanı'nın ardından Avrupa'da en fazla yolcuya hizmet veren havalimanı olarak tarihe geçmiştir. Bu noktada en büyük paya sahip havayolu şirketi, dünyada en çok uçuş yapan Türk Hava Yolları'dır (THY, 2020). Şekil 1'de Statista tarafından hazırlanan 2004 ve 2021 yılları arasındaki dünya havacılığındaki uçuş değişim istatistikleri sunulmaktadır. Pandemi döneminde ciddi bir düşüş olduğu görülmektedir.

Şekil 1

Dünya Havacılığında Uçuş Sayısı Değişimi (Statista,2022)



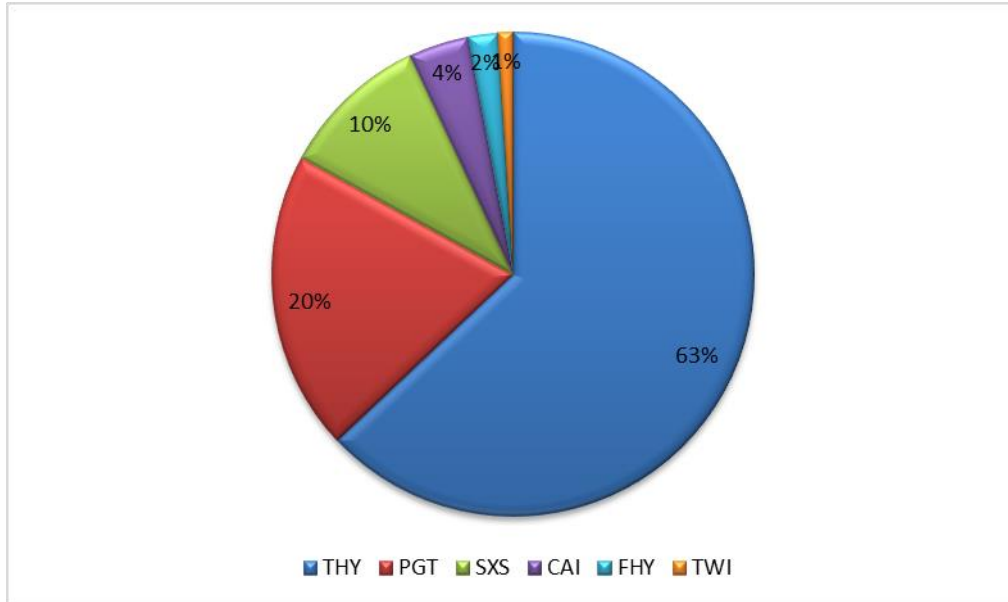
Şekil 2'de Avrupa'nın en iyi on havalimanı paylaşılmıştır.

Şekil 2*Avrupa'nın En İyi 10 Havalimanı (Eurocontrol, 2022)*

2019 yılında tüm dünyayı etkisi altına alan ve tüm sektörleri olumsuz etkileyen COVID-19, havacılık sektörünü tamamen alt üst etmiştir. Dünya havacılık sektörünü hem finansal hem de operasyonel olarak etkileyen COVID-19 pandemisi, ulaşım ağını ciddi şekilde daraltmıştır.

Şekil 3

Yerli Havayolu Şirketlerine Göre Dış Hat Yolcu Trafiği Payları (THY; Türk Hava Yolları, CAI; Corendon, FHY; Freebird (Hürkuş), PGT; Pegasus, SXS; Sun Express)



Öte yandan dünyayı etkisi altına alan COVID-19 salgını Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü'nün (ICAO) paylaştığı verilere göre dış hat uçuşlarında dünya yolcu trafiğinde yüzde 74, koltuk arzında yüzde 66 azalma yaşanmıştır. Havayolu şirketlerinin gelirlerinde ise 250 milyar dolar kayıp oluşmuştur. (ICAO,2022). Şekil 3'te dış hat yolcu trafiği payları gösterilmektedir. Yüzde 63 oranla THY'nin ciddi

bir liderliği söz konusudur.

Dünya üzerinde küreselleşme her geçen gün artmakta ve teknoloji sürekli gelişerek değişmektedir. Bu değişim ve gelişim her sektör kadar havacılık sektörünü de etkilemektedir (Camelia ve Mihai,2008). Sektörde söz sahibi ülkeler kendilerini çağın ve geleceğin gerekliliklerini proaktif bir şekilde hazırlamakta ve çalışmalarını bu doğrultuda gerçekleştirmektedir. Bu çalışmaların ortaya çıkış nedeni sürekli artan ekonomik rekabet üstünlüğü elde etmek ve ülkenin havacılık alanındaki marka değerini arttırmaktır. G-20 ülkeleri dünyanın önde gelen ve güçlü ekonomilerine sahip ülkeleridir ve havacılık sektöründeki payları oldukça fazladır. G-20 ülkeleri her ne kadar havacılık alanında lider havayolu şirketlerine sahip olsalar da Türkiye'nin özellikle son yıllarda havacılık sektörüne dair önemli atılımları G-20 ülkeleriyle rekabet edebilecek seviyede olmuştur.

Dünya havacılık sektörü her geçen gün gelişmektedir. Bu gelişme sonucunda ülkelerin havacılıkta performanslarının ölçülme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu ihtiyacın temel sebebi ülkelerin değişen havacılık sektörü koşullarına kendilerini gelecek dönemlerdeki gelişmelere hazır tutmak ve hem operasyonel hem finansal açıdan sürdürülebilir ve esnek hale getirmek istemeleridir. Bu araştırmanın amacı G-20 ülkelerinin ve Türkiye'nin havacılık alanında operasyonel ve finansal açıdan etkinlik düzeylerinin belirlenmesidir. Çalışmada kullanılacak analitik yaklaşım ülkeler için elde edilen farklı girdi ve çıktı faktörlere bağlı olarak objektif bir değerlendirme imkanı sağlamaktadır. Çalışmanın sonuçlarına göre geride kalınan noktalarda iyileştirmeler yapılacağı vurgulanarak bu eksiklerin nasıl giderileceği belirlenmektedir. Etkin olduğu konularda da başarısının devam etmesi için öneriler yer almaktadır.

Çalışmada non-parametrik bir yaklaşım olan veri zarflama analizi (VZA) yöntemi kullanılarak Charnes, Cooper, Rhodes (CCR), Banker, Charnes ve Cooper (BCC) ve Malmquist Toplam Faktör analizi yöntemleri ile üç aşamalı bir yapı ile geniş çerçeveden bir değerlendirme imkanı sağlanmaktadır.

Literatür araştırmalarına göre, G20 ülkeleri ve Türkiye hava sahasını birlikte değerlendiren yeterince çalışma yapılmadığı gözlenmiş, mevcut literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmada hem Türkiye'nin havacılık sektöründeki rolünün daha iyi anlaşılması hem de G-20 ülkelerine göre olan durumu ele alınacaktır. Elde edilen sonuçların bu konuda çalışan araştırmacılara yol göstermesi hedeflenmiştir.

Literatür Araştırması

Havayolu verimliliğini ölçmek için araştırmacılar tarafından defalarca kullanılan VZA modeli, çıktı yapılandırılmalarına birden çok girdi eklenmesine olanak vererek karar verme birimlerinin etkinliğini ölçmede kullanılan parametrik olmayan bir metottur. Ayrıca ekonomik faaliyetin tüm alanlarına uygulanan verimlilik değerlendirmelerinde sınır tahminleri için en yaygın kullanılan araçtır. Schefczyk M. (1993), havayolu verimliliğinde VZA ilk kullanan kişidir. 15 havayolu şirketinin verilerini kullanarak şirketlerin operasyonel verimliliklerini VZA tekniği ile karşılaştırmaktadır. Analiz, yüksek operasyonel performansın yüksek karlılıkta kilit bir faktör olduğunu göstermektedir. Devam eden süreçte Banker ve Johnston (1994), 1981-1985 döneminde ABD'deki 12 büyük havayolunun etkinliğini değerlendirmek için Banker, Charnes ve Cooper (BCC) tarafından geliştirilen girdi odaklı temel modeli uygulamışlardır.

Chiou ve Chen (2006), VZA'yı kullanarak, Tayvanlı bir iç hat havayolu tarafından işletilen toplam 15 rotayı maliyet ve hizmet etkinliği açısından incelemektedir. Yine Tayvan'da Yu M. (2011), 11 havayolunun performansını değerlendirmek için bir metodoloji sunmuştur. VZA modelinin kullanıldığı başka bir çalışmada Barbot C., Costa A. ve Sochirca. E. (2008), Avrupa havayollarının temsili bir örneğinin teknik etkinliğini, piyasanın serbestleştirilmesi nedeniyle yoğun bir piyasa oynaklığı dönemi olan 2000 ve 2005 yılları arasında analiz etmiştir. Analiz, Simar ve Wilson (2007)

tarafından önerilen iki aşamalı bir prosedüre dayanmaktadır. Göreceli etkinliklerin belirlenmesinde birden çok girdi ve çıktının dahil edilmesine izin veren ve Charnes, Cooper, Rhodes (CCR) tarafından geliştirilen CCR modeli, önceden yüklenmiş, kesik bir regresyon ile eş zamanlı olarak tahmin edilmektedir.

Barros ve Peypoch (2009), VZA-CCR endeks modelini kullanarak, Avrupa'daki büyük havayolu şirketlerinin teknik etkinliğini, piyasadaki deregülasyon nedeniyle yoğun piyasa oynaklığının yaşandığı 2000 ve 2005 yılları arasında analiz etmişlerdir. Zhang ve Hong (2010), dünyadaki büyük havayolu şirketlerinin 1998-2002 verilerini kullanarak yine VZA aracılığıyla verimlilik hesaplamaları yapmışlardır. Ayrıca Zhang ve Hong (2010), kargo taşımacılığına daha fazla odaklanan havayollarının, yolcu taşıyan havayollarından daha verimli olduğu sonucuna varmışlardır.

Merkert ve Hensher 'in (2011) çalışmasında filo planlama stratejisinin havayolu verimliliği üzerindeki etkisi VZA yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma, 2007/2008 ve 2008/2009 mali yıllarında en büyük 58 yolcu havayolunu analiz etmektedir. Analiz edilen havayollarının karşılaştırılabilirliğini sağlamak için, yalnızca ilgili iki yılın her birinde tam 12 ay boyunca faaliyet gösteren ve raporlama yapan havayolları seçilmiştir. Mallikarjun (2015) araştırmasında tüm girdi ve çıktılar orijinal fiziksel boyutlarıyla ele almaktadır. Bu makalede sunulan model, klasik VZA radyal hedefini kullanır ve subjektif ağırlıkların belirtilmesini gerektirmez. Model, ABD havayollarının göreceli verimliliğini ölçen ve verimsizlik kaynaklarını belirlemek için operasyonel süreçlerin ayrıntılı bir incelemesine izin veren birleşik bir üç aşamalı sıralı model geliştirerek birden çok kritik havayolu parametresini ele almaktadır. 2015 yılında başka bir çalışmada 2006-2010 döneminde Hindistan'da faaliyet gösteren havayollarının teknik ve ölçek etkinliğini VZA modeli yardımıyla ölçmektedir (Jain ve Natarajan, 2015).

Hindistan'daki havayollarına atıfta bulunan başka bir çalışmada, Sakthiharan ve Sivaraman (2017), ulusal ve düşük maliyetli havayollarının teknik verimliliğini ölçmek için yine parametrik olmayan VZA modellemesini kullanmıştır. Kottas ve Madas (2018) tarafından yapılan başka bir çalışmada, herhangi bir havayolu ittifak grubuna üyeliğin 30 büyük uluslararası havayolu üzerindeki etkisini değerlendirmek için süper etkinlik ve panel yaklaşımı VZA uygulamıştır.

Park ve diğ. (2020) yapmış oldukları çalışmada, uçuş gecikmesi ve sera gazı dikkate alınarak 12 ABD havayolunun 2013-2016 yılları çevresel verimliliğini ölçmek için VZA modelini uygulamışlardır. Arjomandi ve Seufert (2014), teknik ve çevresel analizlerin yapıldığı bir diğer çalışmada, dünyanın 6 farklı bölgesinde (International Air Transport Association (IATA)'nın bölgesel sınıflandırmasına göre) faaliyet gösteren 48 havayolu şirketinin 2007 ile 2014 yılları arasındaki performanslarını değerlendirmiştir. VZA ile 2010 yılı sonuçlarına göre Arjomandi ve Seufert (2014), Kuzey Asya merkezli havayollarının teknik etkinliğinin ve Avrupa merkezli havayollarının çevresel etkinliğinin yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca düşük maliyetli hava taşıyıcılarının ulusal hava taşıyıcılarına göre daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır. Saini ve diğ. (2022), ABD merkezli ve ABD dışı 13 havayolunun operasyonel, finansal ve çevresel performansını analiz eden bir çalışmada mevcut koltuk mili (ASM) üretimini, gelir yolcu milini (RPM) üretimi, karbondioksit (C₂O) emisyonlarını azaltmak ve aynı anda gelir yaratma ve havayolu operasyonlarını değerlendirmek için VZA yaklaşımı kullanmaktadır.

Zhang ve Hong (2010), yolcu ve kargo taşımacılığını birlikte yürüten 29 havayolu şirketinin 1998-2002 verilerini kullanarak etkinlik analizlerini karşılaştırmışlardır. VZA ile yapılan bu analize göre, Zhang ve Hong (2010), kargo taşımacılığına daha fazla odaklanan şirketlerin, yolcu taşımacılığına odaklanan şirketlere göre daha verimli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Cui ve Ting (2021) yaptıkları çalışmada 1993 ile 2020 yılları arasında yazılmış 130 makaleyi incelemektedir. Makalede havayolu verimliliğinde istenmeyen çıktılara sahip radyal VZA, radyal olmayan VZA, ağı VZA ve dinamik VZA

modelleri tanıtılmaktadır.

Marcikic ve Budimcevic (2018) Air Sırbistan, Hırvatistan Havayolları ve toplam 9 havayolu şirketinin girdi (çalışan sayısı, uçak sayısı, destinasyon sayısı) ve çıktı (yolcu sayısı ve taşınan toplam kargo) verilerini VZA yöntemi ile değerlendirmektedir. Başka bir makalede Tavassoli ve diğ. (2014), İran'da faaliyet gösteren 11 havayolunun VZA ile operasyonel verimliliğini gevşekliğe dayalı olarak değerlendirmektedir.

Ülkemizde Asker (2021), dünya çapında faaliyet gösteren 2013-2018 taşıyıcılarının verimliliğini 19 geleneksel iş modeli ve 17 düşük maliyetli iş modeli kullanarak iki aşamalı VZA tekniği ile analiz etmektedir.

Çalışmada CCR, BCC ve malmquist toplam faktör analizi modelleri üç aşamalı bir yapı ile geniş bir çerçeveden sunulmaktadır. *Literatür araştırmalarına göre G20 ülkeleri ve Türkiye hava sahasını birlikte değerlendiren yeterinde çalışma yapılmadığı gözlenmiş, mevcut literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.* Elde edilen sonuçların bu konuda çalışan araştırmacılara yol göstermesi hedeflenmiştir.

Tablo 1'de ülkelerin havacılık sektöründeki etkinlik analizi çalışmalarına yer verilmiştir.

Tablo 1
Ülkelerin Havacılık Sektöründeki Etkinliğine İlişkin Çalışmaları

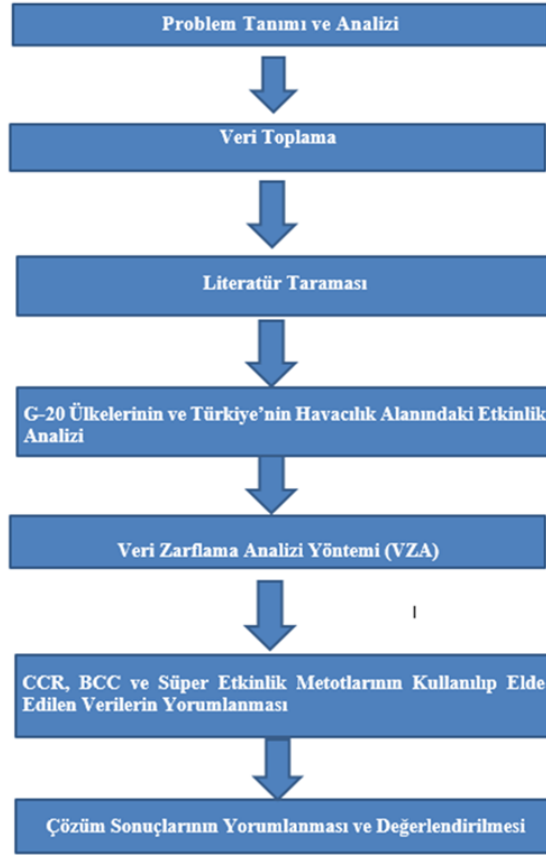
Yazar(s)	Amaç	Yöntem	Bulgular
Schefczyk ve diğ. (1993)	Bu çalışmada havayolu şirketlerinin operasyonel girdi ve çıktıları dikkate alınarak yüksek karlılık ve performans analizi yapılmıştır.	Veri Zarflama Analizi	Analiz, yüksek operasyonel performansın yüksek karlılığın önemli bir parametresi olduğunu vurgulamaktadır.
Chiou ve Chen (2006)	Maliyet ve hizmet verimliliği açısından Tayvanlı bir yerel havayolu şirketi tarafından işletilen toplam 15 rotayı inceleyin.	Veri Zarflama Analizi	Test edilen 15 güzergahın sonuçları, 10 güzergahın nispeten uygun maliyetli olduğunu, 4 güzergahın nispeten hizmet açısından etkin olduğunu ve 5 güzergahın nispeten uygun maliyetli olduğunu göstermektedir.
Barbot, Costa ve Sochirca (2008)	2000 ve 2005 yılları arasında Avrupa havayollarının temsili bir örnekleminin teknik verimliliğini analiz etmek, piyasa deregülasyonundan dolayı yoğun piyasa oynaklığı dönemi.	Veri Zarflama Analizi	VZA analizi, etkinliğin her zaman ilişkili olmadığını öne sürer; bazı havayolları verimli ve etkin bir sonuç ortaya koysa da bu her zaman böyle değildir.
Barros ve Peypoch (2009)	Avrupa'daki büyük havayolu şirketlerinin teknik ve operasyonel verimliliklerini analiz etmek	Veri Zarflama Analizi	Araştırma sonuçlarına göre, havayolunun bulunduğu ülkenin demografik boyutu ölçek ekonomilerini azaltmakta ve bir havayolu ağına üye olmanın verimliliği artırmada önemli rol oynadığı gözler önüne serilmektedir.
Zhang ve Hong (2010)	Yolcu ve kargo taşımacılığını bir arada gerçekleştiren 29 havayolu şirketinin 1998-2002 verileri kullanılarak verimlilik analizlerinin karşılaştırılması.	Veri Zarflama Analizi	Kargo taşımacılığına daha fazla odaklanan şirketlerin, yolcu taşımacılığına odaklanan şirketlerden daha verimli olduğu bulundu.
Merkert ve Hensher (2011)	Bu çalışmanın amacı, filo planlama ve stratejik yönetim kararlarının havayolu verimliliği üzerindeki etkisini analiz etmektir.	Veri Zarflama Analizi	Sonuçta, filo yaşının teknik verimlilik üzerinde önemli bir etkisi yoktur, ancak tahsis ve maliyet etkinliği üzerinde ortalama olarak küçük bir pozitif etki sağlar.

Tavassoli ve Faramarzi (2014)	DEA ile İran'da faaliyet gösteren 11 havayolunun operasyonel verimliliğini bolluklara dayalı olarak değerlendirmek	Veri Zarflama Analizi	İran'da 11 havayolunun değerlendirildiği çalışmada, 11 havayolunun ortalama teknik etkinlik ve hizmet etkinliğinin sırasıyla 0,7599 ve 0,4514 olduğu belirlendi.
Arjomandi ve Seufferth (2014)	Dünyanın 6 farklı bölgesinde faaliyet gösteren 48 havayolu şirketinin performanslarını değerlendirmek	Veri Zarflama Analizi	Sonuç olarak, Kuzey Asya merkezli havayollarının teknik etkinliği ve Avrupa merkezli havayollarının çevresel etkinliği yüksektir. Ayrıca düşük maliyetli hava taşıyıcılarının ulusal hava taşıyıcılarına göre daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır.
Mallikarjun ve diğ. (2015)	Bu makale, ABD'deki uluslararası havayolları ile ulusal havayollarının performanslarını karşılaştırmaktadır.	Veri Zarflama Analizi	Sonuçlar, büyük ABD havayollarının işletme giderlerini harcama ve işletme geliri elde etmede ulusal ABD havayollarından daha verimli olduğunu, ancak hizmet arzı ve talep verimliliğinde önemli bir fark olmadığını göstermektedir.
Natarajan ve diğ. (2015)	2006-2010 döneminde Hindistan'da faaliyet gösteren havayollarının teknik ve ölçek verimliliğini ölçmek	Veri Zarflama Analizi	Sonuç olarak, bütçe havayolları ve düşük maliyetli havayollarının özel sektördeki tam hizmet veren havayollarına göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir.
Kottas ve Madas (2018)	Makalede havayolunun operasyonel ve finansal verimlilik değerlendirmeleri üzerine araştırma yapılmıştır.	Veri Zarflama Analizi	Bulgular, ittifak grubu üyeliğinin üstün havayolu verimliliği ile ilişkili olmadığını göstermektedir.
Marcikic ve Budimcevic (2018)	Air Serbia, Hırvatistan Havayolları ve dünyada hava taşımacılığında bayrak taşıyıcı olan toplam 9 havayolu şirketinin girdi ve çıktıları değerlendirilmek.	Veri Zarflama Analizi	Sonuçlar, havayollarının yolcularının koltuk konforunu ve personel nezaketini en önemli faktörler olarak bulduğunu, fiziksel görünüm ve uçak içi eğlencenin ise en az önemli olduğunu gösterdi.
Dothang ve Yu Pan (2022)	Bu çalışma, mevcut koltuk mili üretimini, gelir yolcu mili üretimini ve gelir üretimini değerlendirmek için ABD merkezli 13 havayolu işletmesini kullanır.	Veri Zarflama Analizi	Sonuçlar, önerilen model ve yöntemin, birden fazla girdi ve çıktı göz önüne alındığında, havayolu verimliliğini başarılı bir şekilde değerlendirebileceğini ve verimliliğe ulaşmada güçlü ve zayıf yönleri hakkında yararlı bilgiler sağlayabileceğini göstermiştir.

Motivasyon

Bu çalışma Türkiye'nin dünya devleri ile olan havacılık yarışındaki konumunu görmek ve kendisini bu alanda daha da geliştirmesi adına yapılması gerekenlere ışık tutması amacıyla hazırlanmıştır. VZA yöntemi kullanılarak doğru ve güvenilir sonuçlar ışığında Türkiye'nin havacılık sektöründe G20 ülkeleri karşısındaki konumu analitik ve objektif yöntemlere dayalı yaklaşımlarla değerlendirilmekte ve eksik olduğu konular belirlenerek kendisini dünya havacılık sıralamasında nasıl daha yüksek konumlara çıkarabileceği kısmı araştırılmıştır. Şekil 4' te çalışmanın adımları aşamalarla gösterilmektedir.

Şekil 4
Çalışmanın Adımları



Tablo 2’de G20 ülkelerinin havacılık, ekonomik ve demografik alanlardaki 5 yıllık verileri verilmektedir. Bu veriler hazırlanırken 2015-2019 yılları esas alınmış ve Dünya Bankası (World Bank) istatistik veri kaynağından yararlanılmıştır.

Tablo 2
Ülkelerin Havacılık Sektöründeki Etkinlikleri (World Bank)

ÜLKE	YIL	Seyahat ve Turizm Geliri (Milyar- Milyon ABD doları)	Nüfus	Yolcu Sayısı (Milyon)	Uçuş Sayısı	Döviz kuru (ABD doları başına Yerel Para Birimi)	Toplam Kargo Hareketleri (Milyon Ton Km.)	Hava limanı Sayısı
USA	2015	230.57	320.738.994	798.222.000	9.526.000	1.00	37.866.000	5.376
	2016	228.55	321.071.755	824.039.000	9.628.000	1.00	38.658.000	5.460
	2017	233.76	325.122.128	849.403.000	9.761.400	1.00	41.592.000	5.136
	2018	241.98	326.838.199	889.024.000	10.012.300	1.00	42.985.000	5.136
	2019	239.45	328.329.953	926.737.000	10.083.000	1.00	42.498.000	5.080
Türkiye	2015	35.65	79.646.178	96.604.000	1.456.673	2.72	2.882.000	50
	2016	26.5	81.019.394	100.366.000	1.452.995	3.02	3.494.000	49
	2017	31.99	82.089.826	107.917.000	1.500.457	3.65	4.800.000	55
	2018	36.79	82.809.304	115.595.000	1.544.169	4.83	5.949.000	55
Çin	2015	41.41	83.481.684	111.131.000	1.556.417	5.67	6.816.000	56
	2015	44.97	1.038.000.000	436.183.000	3.326.000	6.23	19.806.000	206
	2016	44.43	1.039.000.000	487.960.000	3.794.000	6.64	21.305.000	229
	2017	38.56	1.040.000.000	551.234.000	4.418.000	6.76	23.324.000	234
	2018	40.39	1.040.000.000	611.439.000	4.945.000	6.62	25.256.000	238
Kanada	2015	35.83	1.41.000.000	659.629.000	5.521.000	6.91	25.395.000	238
	2015	16 531	35.702.908	80.228.000	4.403.500	1.28	2.075.000	526

	2016	18 144	36.109.487	85.406.000	4.442.000	1.33	2.246.000	526
	2017	20 400	36.545.236	91.404.000	4.474.000	1.30	2.841.000	526
	2018	21 980	37.065.084	91.504.000	4.626.000	1.30	2.482.000	526
	2019	23 889	37.601.230	93.352.000	4.740.000	1.33	3.109.000	528
<i>Japonya</i>	2015	27.29	127.141.000	114.128.000	1.028.384	121.04	8.662.000	98
	2016	33.46	127.076.000	117.708.000	1.064.070	108.79	9.361.000	98
	2017	36.98	126.972.000	129.898.000	1.092.998	112.17	10.685.000	98
	2018	45.28	126.811.000	126.387.000	1.104.111	110.42	9.421.000	98
	2019	49.21	126.933.000	130.233.000	1.123.607	109.01	8.919.000	98
<i>Birleşik Krallık</i>	2015	55.7	65.116.219	131.512.000	2.111.000	0.65	5.423.000	146
	2016	46.2	65.611.593	143.781.000	2.222.000	0.74	5.513.000	146
	2017	50.5	66.058.859	151.159.000	2.261.000	0.78	5.916.000	147
	2018	53.2	66.460.344	165.388.000	2.267.000	0.75	6.198.000	146
	2019	52.7	66.836.327	142.392.000	2.254.000	0.78	5.851.000	145
<i>Fransa</i>	2015	198.6	66.548.272	65.039.000	2.340.000	0.90	4.098.000	464
	2016	201.2	66.724.104	65.362.000	2.390.000	0.90	4.155.000	464
	2017	204.3	66.918.020	68.316.000	2.390.000	0.89	4.261.000	464
	2018	208.5	67.158.348	70.188.000	2.460.000	0.85	4.444.000	464
	2019	210.7	67.388.001	71.289.000	2.480.000	0.89	4.523.000	464
<i>Almanya</i>	2015	50.67	81.686.611	215.900.000	1.850.000	0.9042	6.986.000	539
	2016	52.23	82.348.669	224.400.000	1.910.000	0.8971	6.943.000	539
	2017	55.75	82.657.002	234.500.000	2.010.000	0.8912	7.902.000	546
	2018	59.45	82.905.782	244.500.000	2.080.000	0.8478	7.970.000	540
	2019	58.37	83.092.962	237.200.000	2.100.000	0.8904	7.764.000	539
<i>Endonezya</i>	2015	12.05	251.091.970	90.095.000	833.610	13.389.41	759.000	237
	2016	12.57	261.850.182	99.274.000	938.580	13.308.33	975.000	237
	2017	14.69	264.498.852	108.393.000	1.029.000	13.380.83	1.052.000	237
	2018	17.91	267.066.843	115.154.000	1.104.320	14.236.94	1.132.000	237
	2019	18.41	269.582.878	116.740.000	956.220	14.147.67	982.000	237
<i>Hindistan</i>	2015	21.47	1.032.000.000	15.820.000	1.680.500	64.15	1.834.000	350
	2016	23.11	1.034.000.000	134.980.000	1.956.000	67.20	1.894.000	346
	2017	27.88	1.035.000.000	139.752.000	2.025.300	65.12	2.407.000	449
	2018	29.14	1.037.000.000	164.034.000	2.377.000	68.39	2.704.000	449
	2019	31.66	1.038.000.000	167.499.000	2.427.500	70.42	1.938.000	449
<i>Arjantin</i>	2015	5.44	43.131.966	14.245.000	246.000	9.23	244.000	1.131
	2016	5.47	43.590.368	15.076.000	260.350	14.76	254.000	1.147
	2017	5.83	44.044.811	16.749.000	289.260	16.56	305.000	1.155
	2018	6	44.594.502	18.084.000	312.315	28.09	312.000	1.163
	2019	5.65	44.938.712	19.461.000	336.100	48.15	280.000	1.169
<i>Avustralya</i>	2015	36.25	23.815.995	69.779.000	809.341	1.33	1.907.000	544
	2016	39.06	24.190.907	72.446.000	824.459	1.35	1.869.000	550
	2017	43.98	24.595.202	74.257.000	835.500	1.30	1.983.000	557
	2018	47.33	24.966.643	75.667.000	836.360	1.34	2.028.000	562
	2019	47.95	25.340.297	76.850.000	839.870	1.44	1.931.000	561
<i>İtalya</i>	2015	46.300	60.730.582	152.000.000	2.460.000	0.	945.000	133
	2016	48.900	60.627.498	164.000.000	2.550.000	0.90	1.083.000	133
	2017	49.400	60.536.709	174.000.000	2.660.000	0.89	1.437.000	134
	2018	52.530	60.421.760	180.000.000	2.760.000	0.85	1.418.000	135
	2019	49.530	59.729.081	190.000.000	2.730.000	0.89	1.345.000	136
<i>Brezilya</i>	2015	6.5	205.188.205	110.300.000	878.000	3.33	1.494.000	711
	2016	6.2	206.859.578	113.900.000	965.000	3.49	1.514.000	721
	2017	6.6	208.504.960	116.800.000	940.000	3.19	1.737.000	727
	2018	6.8	210.166.592	121.300.000	967.000	3.65	1.846.000	733
	2019	7.4	211.782.878	123.000.000	951.000	3.94	1.521.000	737
<i>Meksika</i>	2015	18.73	120.149.897	46.966.000	760.550	15.85	714.000	98
	2016	20.62	121.519.221	53.313.000	813.080	18.66	761.000	98
	2017	22.47	122.839.258	58.537.000	843.620	18.93	929.000	98
	2018	23.8	124.013.861	64.569.000	871.082	19.24	1.063.000	98
	2019	25.85	125.085.311	69.937.000	875.000	19.26	1.073.000	98
<i>Suudi Arabistan</i>	2015	11.18	32.749.848	33.431.000	660.790	3.75	827.000	214
	2016	13.44	33.416.270	35.092.000	703.510	3.75	834.000	217
	2017	15.02	34.193.122	37.503.000	741.290	3.75	868.000	224
	2018	16.97	35.018.133	39.767.000	771.830	3.75	1.085.000	228
	2019	19.85	35.827.362	46.181.000	912.810	3.75	2.043.000	232
<i>Rusya</i>	2015	13.19	144.096.870	76.846.000	1.349.888	62.78	4.761.000	2.417
	2016	12.82	144.342.397	77.458.000	1.303.571	65.95	5.863.000	2.376
	2017	14.94	144.496.739	89.373.000	1.503.430	59.12	6.845.000	2.382
	2018	18.73	144.477.859	99.327.000	1.670.870	63.71	6.811.000	2.387
	2019	17.23	144.406.261	108.857.000	1.831.190	64.03	6.481.000	2.418
<i>Güney Afrika</i>	2015	11.2	55.876.504	18.882.000	458.200	12.76	370.000	135

	2016	12.2	56.422.274	19.744.000	464.800	14.71	415.000	135
	2017	12.8	56.641.209	20.821.000	475.100	13.32	427.000	135
	2018	14.4	57.339.635	24.660.000	495.500	13.23	442.000	135
	2019	16.5	58.087.055	26.211.000	492.500	14.45	450.000	135
	2015	17,1	51.000.000	104.100.000	1.150.000	1149.8	4.100.000	119
	2016	8.17	51.440.000	104.200.000	1.140.000	1165	5.040.000	119
<i>Güney Kore</i>	2017	26.7	51.250.000	110.000.000	1.012.572	1131.8	5.470.000	119
	2018	22.7	51.600.000	129.500.000	1.230.000	1097	5.980.000	119
	2019	32.8	51.000.000	1.193.000.000	1.210.000	1171,89	5.830.000	119

YÖNTEM

Araştırma, VZA yöntemi kullanılarak ele alınmıştır. VZA yöntemi, doğrusal programlama modeline dayalı, parametrik olmayan bir analiz yöntemidir (Ervural ve diğ., 2018). Bir dizi karar verme biriminin göreceli etkinliğini değerlendirmek için yararlı bir tekniktir (El-Mahgary ve Lahdelma, 1994).

Özellikle belirli sektörlerde ait işletmelerde benzer üretim süreçleri arasındaki verimliliğin değerlendirilmesi için VZA uygulaması yaygınlaşmıştır (Kottas, Bozoudis ve Madas, 2020). VZA analizi kapsamında girdi odaklı CCR ve BCC modellerinden yararlanılmıştır. VZA uygulaması DEA-Solver paket programı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ülkelerin ekonomik gelişmişliklerinde ihracat, verimlilik, kur etkisi, Endüstri 4.0 gibi güncel gelişmelere adaptasyon gibi temel göstergeler etkili olmaktadır (İnce ve diğ., 2023; Baydaş ve diğ., 2023; Koç ve Özcan, 2023).

CCR ve BCC Modelleri

CCR modeli karar birimlerinin toplam etkinlik değerlerini elde etmek için, BCC modeli ise karar birimlerinin teknik etkinlik değerlerini elde etmek için kullanılmaktadır (Depren, 2008).

CCR Girdi Yönlü – Primal Modeli

$$\text{Min } z_0 = \theta$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j Y_{rj} - S_r^+ = Y_{r0} \quad r = 1, \dots, s$$

$$\theta X_{i0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j X_{ij} - S_i^- = 0 \quad i = 1, \dots, m$$

$$\lambda, S^+, S^- \geq 0$$

CCR Girdi Yönlü – Dual Modeli

$$\text{max } w_0 = \sum_{r=1}^s \mu_r Y_{r0}$$

$$\sum_{i=1}^m V_i X_{i0} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s \mu_r Y_{rj} - \sum_{i=1}^m V_i X_{ij} \leq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$\mu, v \geq 0$$

(Okursoy, Tezsürücü, 2014)

BCC Girdi Yönlü – Primal Modeli

$$\text{Min } z_0 = \theta$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j Y_{rj} - S_r^+ = Y_{r0} \quad r = 1, \dots, s$$

$$\theta X_{i0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j X_{ij} - S_i^- = 0 \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda, S^+, S^- \geq 0$$

BCC Girdi Yönlü – Dual Modeli

$$\text{max } w_0 = \sum_{r=1}^s \mu_r Y_{r0} + u_0$$

$$\sum_{i=1}^m v_i X_{i0} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s \mu_r Y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i X_{ij} + u_0 \leq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

$$\mu, v \geq 0$$

u_0 serbest değişken

ur: k. KVB tarafından r. çıktıya verilen ağırlık,
 vi: k. KVB tarafından i. girdiye verilen ağırlık,
 Y_{rj}: j. KVB tarafından üretilen r. çıktı,
 X_{ij}: j. KVB tarafından kullanılan i. girdi,
 λ_j: j. KVB'nin aldığı yoğunluk değeri,
 S_i⁻: k. KVB'nin i. girdisine ait artık değişken (Girdi fazlası),
 S_r⁺: k. KVB'nin r. çıktısına ait artık değişken (Çıktı fazlası),
 i = 1, ..., m (girdi sayısı):
 r = 1, ..., p (çıktı sayısı) ve
 j = 1, ..., n (KVB sayısı) olarak ifade edilmektedir.

(Budak, 2011)

Malmquist Toplam Faktör Analizi

Ülkelerin havacılık sektöründeki faaliyetlerini ve zamansal değişimlerini ölçmek için Malmquist Toplam Faktör analizi uygulanmıştır. Malmquist Toplam Faktör Analizi verilerin karşılaştırılması ve zamansal değişkenlik gibi hesaplamaların yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Korelasyon Analizi

G20 ülkelerinin 2014-2019 yılları arasındaki verileri arasındaki korelasyon MİNİTAB adlı istatistiksel paket yazılım ile analiz edilmiştir. Analiz yapılırken nüfus değişkeni, ülkelerin yerel para birimlerinin dolar karşısındaki değerleri ve seyahat-turizm gelirleri girdi olarak alınmıştır. Taşınan yolcu sayısı, gerçekleştirilen uçuş sayısı, ülkelerde bulunan havalimanı sayısı ve toplam kargo hareketleri ise çıktı olarak kabul edilmiştir. Toplamda 7 değişken kullanılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen korelasyon sonuçları Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3
Önemli Bazı Ülkelerin Korelasyon Katsayıları

	Nüfus ve Yolcu Sayısı	Nüfus ve Uçuş Sayısı	Nüfus ve Toplam Yük Hareketleri	Nüfus ve Havalimanı Sayısı	Seyahat ve Turizm Geliri ile Uçuş Sayısı	Seyahat ve Turizm Geliri ile Toplam Kargo Hareketleri	Seyahat ve Turizm Geliri ile Yolcu Sayısı	Seyahat ve Turizm Geliri ile Havalimanı Sayısı	Döviz Kuru ile Yolcu Sayısı	Döviz Kuru ile Uçuş Sayısı	Döviz Kuru ile Toplam Kargo Hareketleri	Döviz Kuru ile Havalimanı Sayısı
ABD	0,963	0,970	0,965	-0,951	0,629	0,578	0,564	-0,663	*	*	*	*
Türkiye	0,924	0,928	0,976	0,877	0,672	0,551	0,474	0,717	0,864	0,974	0,986	0,851
Çin	0,966	0,970	0,941	0,901	0,348	0,512	0,386	0,377	0,824	0,829	0,788	0,908
Kanada	0,916	0,974	0,851	0,883	0,951	0,876	0,945	0,853	0,482	0,482	0,466	0,295
Hindistan	0,993	0,993	0,458	0,833	0,932	0,490	0,932	0,934	0,900	0,900	0,107	0,490

Girdi ve Çıktı Değişkenlerinin Tanımları

Çalışmada kullanılan girdi ve çıktı değişkenlerin tanımları aşağıda verilmiştir.

Nüfus: Bir ülkede, bir bölgede veya belirli bir zamanda yaşayan insanların toplam sayısına nüfus denir. Çalışmada kullanılan ülkelerin nüfus verileri Dünya Bankası istatistik sitesinden temin edilmiştir.

Turizm ve Seyahat Gelirleri: Turizm, insanların farklı ülke, şehir veya bölgelerin doğal ve tarihi güzelliklerini geçici olarak keşfetmesidir. Bu işlem ülkelere ekonomik olarak özellikle döviz cinsinden gelir sağlamaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde turizm gelirleri ekonomide önemli bir paya sahiptir. Bu girdi değişkeninin verileri başta Dünya Bankası olmak üzere çeşitli istatistik sitelerinden elde edilmiştir.

Döviz Kuru: Bir ülkenin para biriminin başka bir ülke parası karşısındaki değerine döviz kuru denir. Bu çalışmada G20 ülkelerinin yerel para birimlerinin ABD doları karşısındaki değerleri girdi olarak alınmıştır. Veriler Dünya Bankası web sitesinden elde edilmiştir.

Yolcu Sayısı: Havacılık alanında 2015'ten 2019'a kadar her yıl gerçekleştirilen çalışmada G20 ülkelerinin kaç yolcu ele aldığı belirlendi. Yolcu sayılarının daha stabil olabilmesi için koronavirüs pandemisi öncesi yıllar konuşuldu. Bu çıktı verileri Dünya Bankası web sitesinden elde edilmiştir.

Uçuş Sayısı: İncelenen 5 yılda G20 ülkeleri tarafından gerçekleştirilen uçuş sayıları araştırılmış ve çıktı olarak kullanılmıştır. Uçuş sayılarını daha stabil hale getirmek için koronavirüs pandemisi öncesinde ele alınmıştır. Bu veriler Dünya Bankası istatistik sitesinden elde edilmiştir.

Toplam Kargo Hareketleri: Elbette her ülke sadece havacılık alanında insan taşımacılığı yapmıyor. İnsan taşımacılığının yanı sıra canlı hayvan, tehlikeli madde ve çeşitli yüklerin taşınması da gerçekleştirilmektedir. Bu taşıma eylemi, ülkelerin diğer ülkelerle olan ticari ağını da ortaya koymaktadır. Çalışmada kullanılan bu çıktı verileri Dünya Bankası istatistik web sitesinden elde edilmiştir.

Havalimanı Sayısı: Bir ülkedeki havalimanlarının sayısı o ülkenin ticari, ekonomik, turistik ve stratejik önemini gösterir. Bir ülke ne kadar çok havalimanına sahipse o kadar gelişmiştir. Ülke elde ettiği gelir, doğal ve tarihi güzelliklerinin bolluğu ve stratejik konumu paralelinde bir havalimanına sahip olabiliyor. Bu çıktı değişkeninin verileri çeşitli istatistiksel sitelerden elde edilmiştir.

BULGULAR

Bu kısımda analiz sonuçları detaylı biçimde değerlendirilerek sunulmuştur. Buna göre CCR ve BCC modelleri sunulmuştur. Etkin olan G20 ülke grafikleri paylaşılmıştır. Ayrıca Malmquist indeks analiz ile de en son değerlendirme yapılmıştır. Çalışma DEA-Solver paket yazılımı desteğiyle yapılmıştır.

CCR-I Modeli

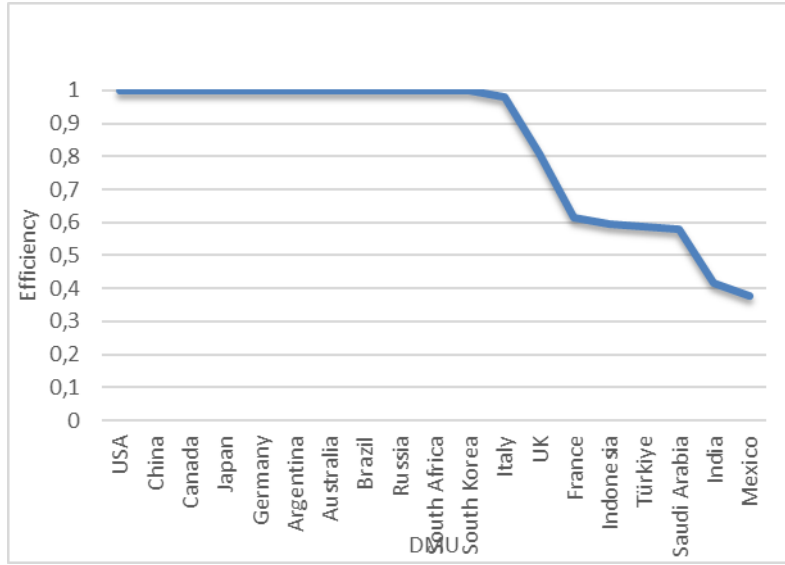
Girdi odaklı CCR modeli için öncelikle analiz yapılmıştır. Buna göre Tablo 4'te CCR modeli sonuçları sunulmuştur.

Tablo 4
Girdi Odaklı CCR Modeli Sonuçları

2015			2016			2017			2018			2019			
No.	DMU	Score	Rank	No.	DMU	Score	Rank	No.	DMU	Score	Rank	No.	DMU	Score	Rank
1	ABD	1	1	1	USA	1	1	1	ABD	1	1	1	ABD	1	1
2	Türkiye	0,5856	16	2	Türkiye	0,8063	14	2	Türkiye	0,5434	13	2	Türkiye	0,8361	14
3	Çin	1	1	3	Çin	1	1	3	Çin	0,5163	14	3	Çin	1	1
4	Kanada	1	1	4	Kanada	1	1	4	Kanada	1	1	4	Kanada	1	1
5	Japonya	1	1	5	Japonya	0,8199	12	5	Japonya	0,8219	12	5	Japonya	0,9369	12
6	Birleşik K.	0,8081	13	6	Birleşik K.	0,8424	11	6	Birleşik K.	1	1	6	Birleşik K.	0,8669	13
7	Fransa	0,6135	14	7	Fransa	0,6112	16	7	Fransa	0,8936	11	7	Fransa	0,5055	17
8	Almanya	1	1	8	Almanya	1	1	8	Almanya	1	1	8	Almanya	1	1
9	Endonezya	0,5954	15	9	Endonezya	0,6116	15	9	Endonezya	0,2863	16	9	Endonezya	0,6176	15
10	Hindistan	0,4145	18	10	Hindistan	0,3191	19	10	Hindistan	0,219	17	10	Hindistan	0,3191	19
11	Arjantin	1	1	11	Arjantin	1	1	11	Arjantin	1	1	11	Arjantin	1	1
12	Avustralya	1	1	12	Avustralya	1	1	12	Avustralya	1	1	12	Avustralya	1	1
13	İtalya	0,9784	12	13	İtalya	1	1	13	İtalya	1	1	13	İtalya	1	1
14	Brezilya	1	1	14	Brezilya	1	1	14	Brezilya	1	1	14	Brezilya	0,2205	15
15	Meksika	0,379	19	15	Meksika	0,4035	18	15	Meksika	0,2019	18	15	Meksika	0,4597	18
16	Suudi Ara	0,578	17	16	Suudi Ara	0,5305	17	16	Suudi Ara	0,4842	15	16	Suudi Ara	0,5406	16
17	Rusya	1	1	17	Rusya	1	1	17	Rusya	1	1	17	Rusya	1	1
18	Güney Af	1	1	18	Güney Af	1	1	18	Güney Af	0,1993	19	18	Güney Af	1	1
19	Güney Kd	1	1	19	Güney Kd	0,8138	13	19	Güney Kd	0,9193	10	19	Güney Kd	1	1

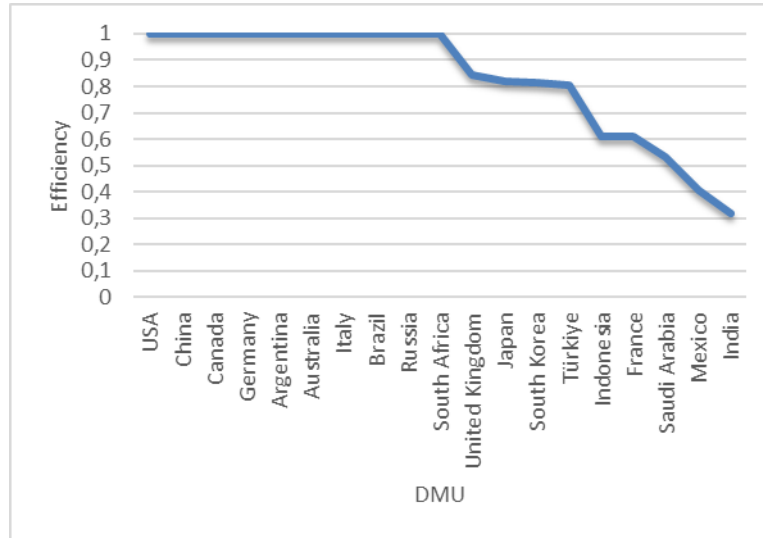
2015'in G20 ülkelerinin her biri için değerlendirilmesi ve girdi odaklı CCR modelinin uygulanması sonucunda toplam 11 ülke %100 etkinlikle sonuç sağlamıştır (ABD, Çin, Kanada, Japonya, Almanya, Arjantin, Avustralya, Brezilya, Rusya, Güney Afrika ve Güney Kore). Bu ülkelerin etkin olduğunu analiz sonucunda elde ettiğimiz etkinlik puanlarından anlayabiliriz. Bir ülkenin verimlilik puanı 1 ise, o ülke verimlilik açısından oldukça iyidir. Geriye kalan 8 ülkeden İngiltere, İtalya ve Fransa etkinlik noktası aralığına yakın değerlerle sonuçlandırdığı görülmektedir. Etkin olan ülkelere bakıldığında Kuzey Amerika ülkelerinden ABD ve Kanada, Asya ülkelerinden Çin, Japonya ve Güney Kore, Avrupa'dan Almanya, Rusya ve Afrika'dan Güney Afrika olarak dağıldığı görülmektedir. Etkin ülkelerin çoğunun dünyada ekonomileri güçlü olan gelişmiş ülkeler olduğu anlaşılmaktadır. 2015 CCR girdi odaklı (Şekil 5) analizi sonucunda Türkiye 0,585 puanla G20 ülkeleri arasında 16. sırada yer almıştır. Etkinlikten uzak sonuç veren ülkelerde işsizlik oranının yüksek veya artma eğiliminde olması sorunu görülebilmektedir. Çünkü havacılık sektörü bir ülkedeki en büyük istihdam sektörlerinden biridir. Bu sektörün az gelişmiş olması, ülke halkına havacılık alanında sınırlı istihdam sağlanabileceği anlamına gelmektedir. Böylece havacılık eğitimi mezunları kendi sektörlerinde çalışma imkânı bulamadıklarında farklı sektörlerle yöneleceklerdir. Bu da yığılmaya yol açacak ve işsizlik oranında artışa görülecektir.

Şekil 5
2015 Yılı G20 Ülkeleri Etkinlik Sıralaması (CCR-I)



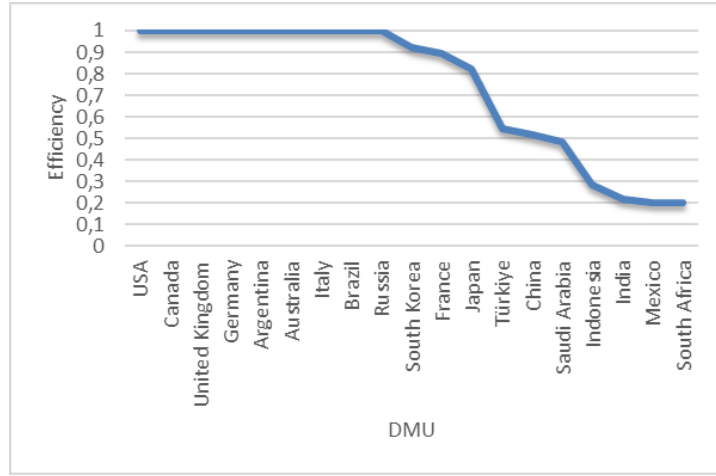
2016 CCR modelinin (Şekil 6) sonuçları ele alındığında %100 verimliliğe sahip ülke sayısının bir önceki yıla göre 10'a düştüğü görülmektedir. %100 verimli olmayan ülkeler olan Türkiye, Japonya, İngiltere ve Güney Kore ise verimlilik skoru 1'e yakın ülkeler olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 6
2016 Yılı G20 Ülkeleri Etkinlik Sıralaması (CCR-I)

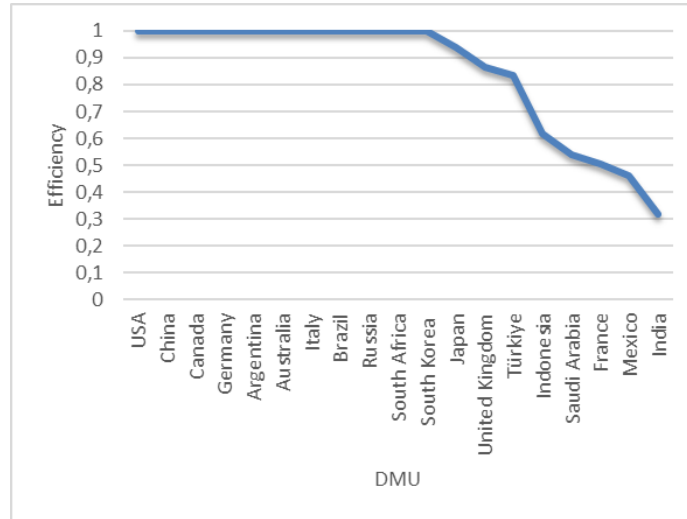


Geriye kalan 2017, 2018 ve 2019 yıllarının (Şekil 6-Şekil 9 arasında görüleceği gibi) CCR analiz sonuçlarını ele alırsak 2017'de 9, 2018'de 11 ve 2019'da 8 ülkenin %100 verimlilik gösterdiği sonucuna varıyoruz. Söz konusu 5 yılda her yıl %100 verimlilik gösteren ülkeler ABD, Kanada, Arjantin, Avustralya ve Rusya olmuştur. Bu ülkeler havacılık alanındaki performanslarını her yıl istikrarlı bir şekilde sürdürmüştür. Bu istikrarlı ve güçlü performansın altında yatan ana nedenlere örnek olarak havacılık sektörünün özellikle Rusya ve ABD'de gelişmesi ve bu sektörde kullanılan hammaddelerin düşük maliyetli olması verilebilir.

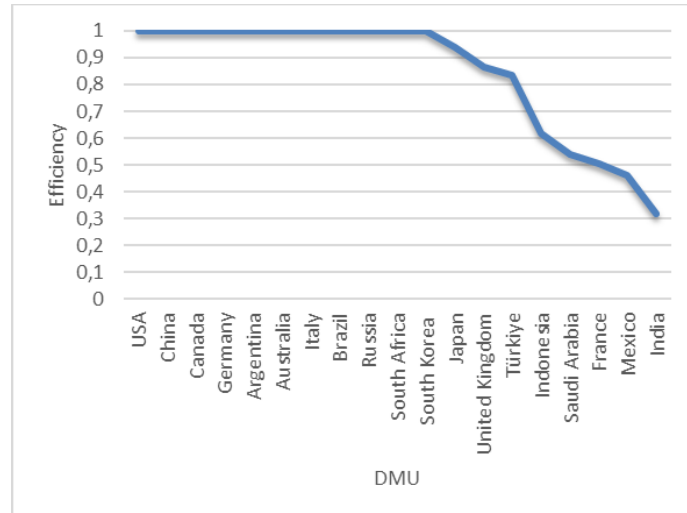
Şekil 7
2017 Yılı G20 Ülkeleri Etkinlik Sıralaması (CCR-I)



Şekil 8
2018 Yılı G20 Ülkeleri Etkinlik Sıralaması (CCR-I)



Şekil 9
2019 Yılı G20 Ülkeleri Etkinlik Sıralaması (CCR-I)



BCC-I Modeli:

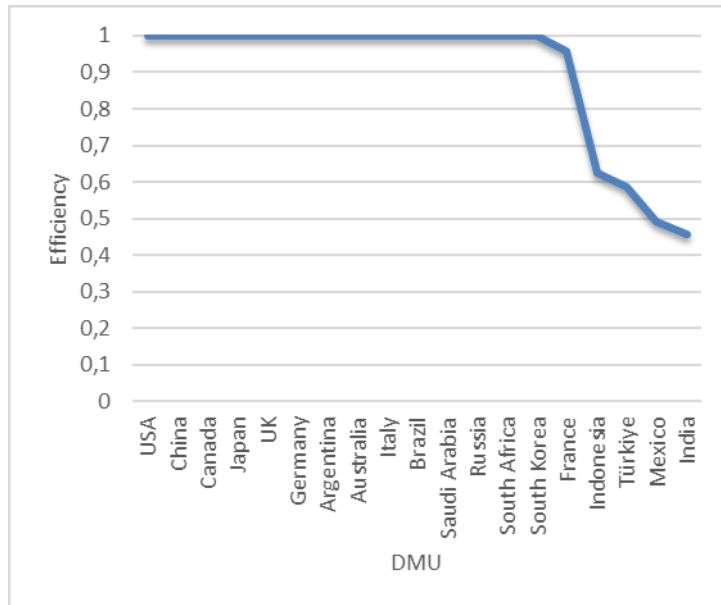
Ardından girdi odaklı BCC modeli ile analiz yapılmıştır. Bu şekilde iki farklı yöntemin birbiriyle tutarlı sonuç verip vermeyeceği de ölçülmektedir.

2015'in G20 ülkelerinin her biri için değerlendirilmesi ve girdi odaklı BCC-I modelinin uygulanması sonucunda toplam 14 ülke için %100 etkinlikte sonuç elde edilmiştir. (ABD, Çin, Kanada, Japonya, İngiltere, Almanya, Arjantin, Avustralya, İtalya, Brezilya, Suudi Arabistan, Rusya, Güney Afrika ve Güney Kore). Analiz sonuçları Tablo 5'te gösterilmektedir.

Tablo 5
Girdi Odaklı BCC Modeli Sonuçları

2015				2016				2017				2018				2019			
No.	DMU	Score	Rank	No.	DMU	Score	Rank	No.	DMU	Score	Rank	No.	DMU	Score	Rank	No.	DMU	Score	Rank
1	ABD	1	1	1	ABD	1	1	1	ABD	1	1	1	ABD	1	1	1	ABD	1	1
2	Türkiye	0,5871	17	2	Türkiye	0,826	16	2	Türkiye	0,6488	16	2	Türkiye	1	1	2	Türkiye	1	1
3	Çin	1	1	3	Çin	1	1	3	Çin	1	1	3	Çin	1	1	3	Çin	1	1
4	Kanada	1	1	4	Kanada	1	1	4	Kanada	1	1	4	Kanada	1	1	4	Kanada	1	1
5	Japonya	1	1	5	Japonya	0,9887	14	5	Japonya	0,9224	14	5	Japonya	0,987	16	5	Japonya	0,4926	17
6	Birleşik K	1	1	6	Birleşik K	1	1	6	Birleşik K	1	1	6	Birleşik K	1	1	6	Birleşik K	1	1
7	Fransa	0,9574	15	7	Fransa	0,9995	13	7	Fransa	1	1	7	Fransa	1	1	7	Fransa	1	1
8	Almanya	1	1	8	Almanya	1	1	8	Almanya	1	1	8	Almanya	1	1	8	Almanya	1	1
9	Endonezy	0,6243	16	9	Endonezy	0,6176	17	9	Endonezy	0,3485	18	9	Endonezy	0,62	17	9	Endonezy	0,1382	19
10	Hindistan	0,4582	19	10	Hindistan	0,3995	19	10	Hindistan	0,2239	19	10	Hindistan	0,3339	19	10	Hindistan	0,2009	18
11	Arjantin	1	1	11	Arjantin	1	1	11	Arjantin	1	1	11	Arjantin	1	1	11	Arjantin	1	1
12	Avustralya	1	1	12	Avustralya	1	1	12	Avustralya	1	1	12	Avustralya	1	1	12	Avustralya	1	1
13	İtalya	1	1	13	İtalya	1	1	13	İtalya	1	1	13	İtalya	1	1	13	İtalya	1	1
14	Brezilya	1	1	14	Brezilya	1	1	14	Brezilya	1	1	14	Brezilya	1	1	14	Brezilya	1	1
15	Meksika	0,4922	18	15	Meksika	0,44	18	15	Meksika	0,3871	17	15	Meksika	0,5603	18	15	Meksika	0,7346	16
16	Suudi Ara	1	1	16	Suudi Ara	1	1	16	Suudi Ara	1	1	16	Suudi Ara	1	1	16	Suudi Ara	1	1
17	Rusya	1	1	17	Rusya	1	1	17	Rusya	1	1	17	Rusya	1	1	17	Rusya	1	1
18	Güney Af	1	1	18	Güney Af	1	1	18	Güney Af	0,7424	15	18	Güney Af	1	1	18	Güney Af	0,9791	15
19	Güney Kd	1	1	19	Güney Kd	0,9677	15	19	Güney Kd	1	1	19	Güney Kd	1	1	19	Güney Kd	1	1

Şekil 10
2015 Yılı G20 Ülkeleri Etkinlik Sıralaması (BCC-I)

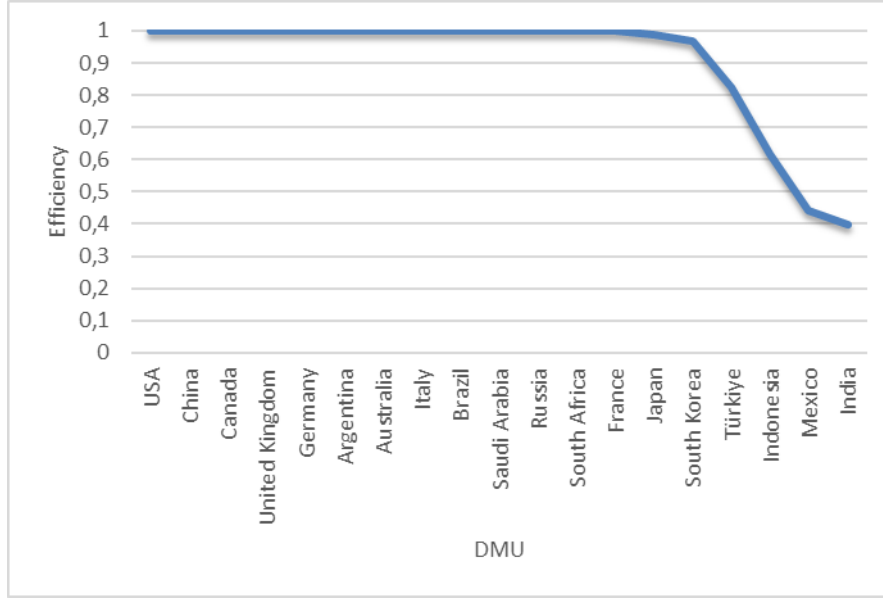


Geriye kalan 5 ülkeden Fransa etkin skor aralığına yakın değerler vermiştir.

Etkin olan ülkeler ele alındığında Kuzey Amerika ülkelerinden ABD ve Kanada, Asya ülkelerinden Çin, Japonya ve Güney Kore, Avrupa'dan Almanya, Rusya ve Afrika'dan Güney Afrika olarak dağıldığı görülmektedir. Etkin ülkelerin çoğunun dünyada ekonomileri güçlü olan gelişmiş ülkeler olduğu görülebilmektedir. Şekil 10'da görüldüğü gibi 2015 yılında BBC-I'nın girdi odaklı analizi sonucunda Türkiye 0,5871 puanla G20 ülkeleri arasında 17. sırada yer almıştır.

Şekil 11

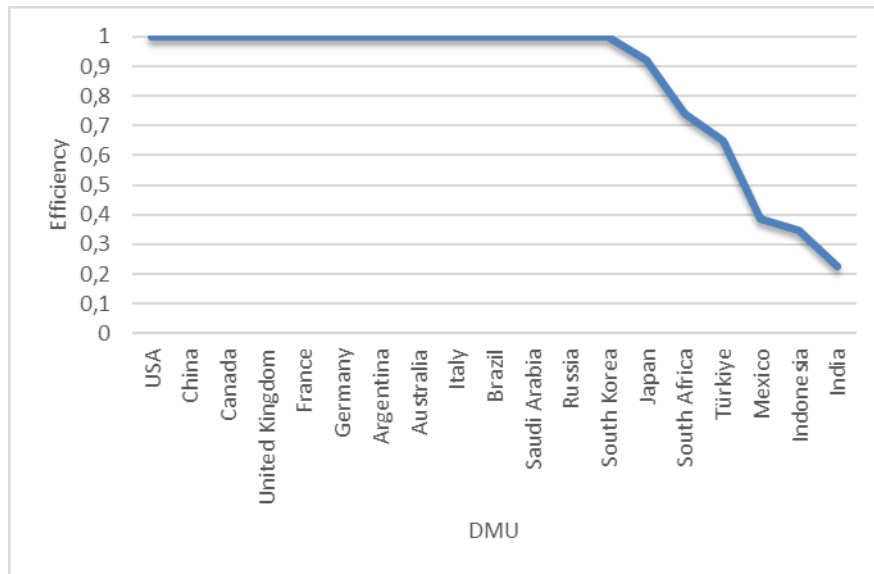
2016 Yılı G20 Ülkeleri Etkinlik Sıralaması (BCC-I)



2016 BCC-I modelinin sonuçlarına bakıldığında %100 verimliliğe sahip ülke sayısı 12'dir. Türkiye'nin etkin ülkeler arasında yer almadığı fakat bir önceki yıla göre artış gösterdiği görülmektedir. Japonya'nın 2015 yılına göre verimliliğini düşürdüğü ve etkin olmadığı görülmektedir.

Şekil 12

2017 Yılı G20 Ülkeleri Etkinlik Sıralaması (BCC-I)

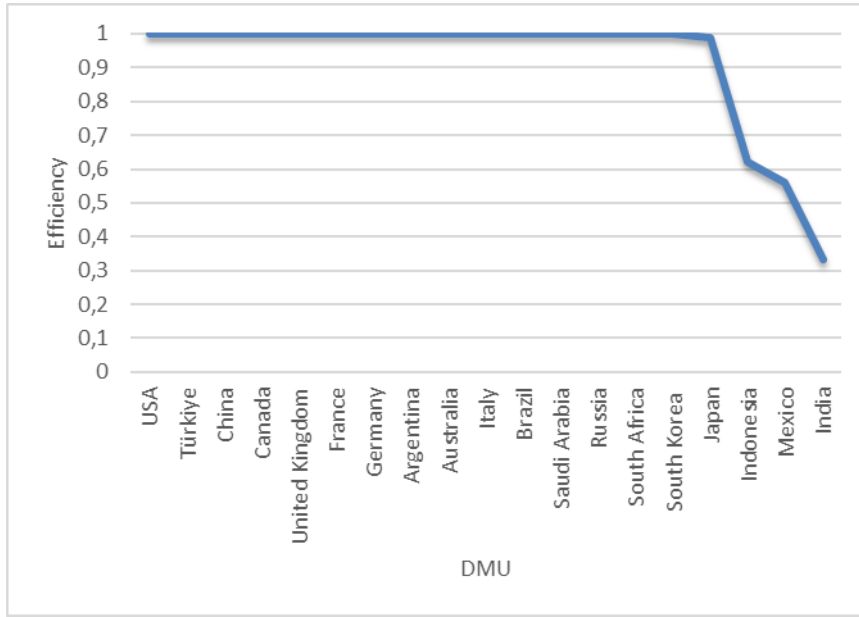


Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14 arasında görüleceği gibi 2017, 2018 ve 2019 yıllarının kalan BCC-I analiz sonuçları değerlendirildiğinde 2017'de 13, 2018'de 16 ve 2019'da 14 ülkenin %100

verimlilik gösterdiği sonucuna varılmaktadır.

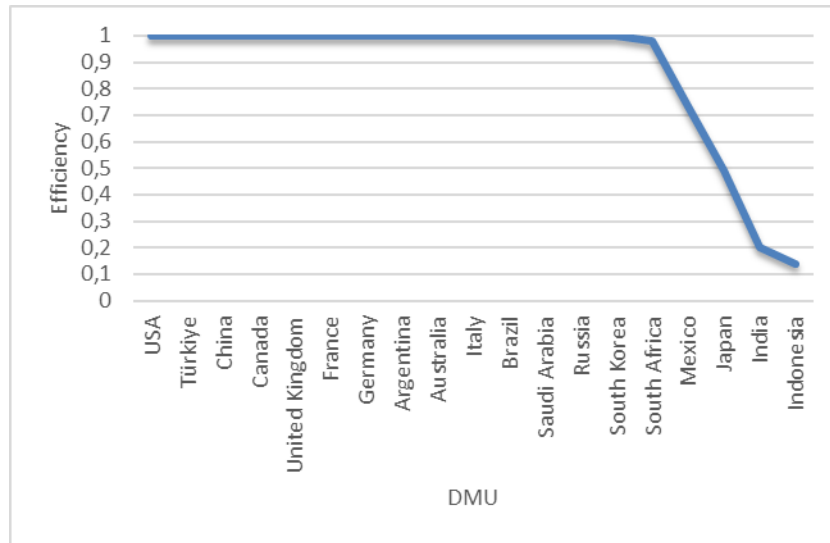
Şekil 13

2018 Yılı G20 Ülkeleri Etkinlik Sıralaması (BCC-I)



Şekil 14

2019 Yılı G20 Ülkeleri Etkinlik Sıralaması (BCC-I)



Malmquist Toplam Faktör Analizi

Zaman periyoduna bağlı olarak verimlilikleri yani etkinlik analizi için kullanılan diğer bir yöntemdir. Toplam faktör verimliliği açısından değerlendirmeler Tablo 6 - Tablo 8’de yer almaktadır. Toplam faktör verimliliği açısından değerlendirildiğinde ABD, Kanada, Arjantin, Avustralya, Rusya CCR modellerine göre etkin çıkan G20 ülkeleri arasında olduğu görülmektedir.

2015 yılı verilerinde birçok girdi ve çıktıda olduğu gibi bu yıl bazında da finansal ve operasyonel olarak birçok etkinlik ve verimlilik değerinin arttığı görülmektedir. 2016 malmquist analizinin sonuçlarını verimlilik ve etkinlik açısından değerlendirildiğinde özellikle ABD, Çin, Kanada, Rusya ve Suudi

Arabistan 'nın güçlü sonuçlar verdiği görülmektedir. 2017 yılında Amerika Birleşik Devletleri, havacılık endüstrisinde verimlilik açısından önde gelen ülkelerden biri olarak öne çıkmıştır. ABD, büyük havayollarına, gelişmiş havaalanlarına ve yüksek teknolojik uçak üreticilerine ev sahipliği yapmasıyla bilinir. Ayrıca ABD'de havacılık eğitiminde önde gelen okullar ve enstitüler bulunmaktadır. ABD'nin yanı sıra 2017 malmquist analizi sonuçlarına göre Almanya, Avustralya, Rusya ve Çin'in de oldukça etkili olduğu görülmektedir.

2018 yılı analizinde havacılıkta en etkin ülkelerin ABD, Türkiye, Kanada ve İngiltere olduğu görülmektedir. Bu durum kuşkusuz ülkelerin gelişmiş ekonomilere ve dünyada söz sahibi olan havayollarına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Öte yandan, Türkiye'nin havacılıktaki etkinliğinin bir önceki yıla göre arttığı gözlemlenmektedir. Türkiye'nin toplam kargo hareketlerini, sefer sayısını ve yolcu sayısını bir önceki yıla oranla %20 artırdığı görülmektedir. Bunda dünyanın en çok noktasına uçan havayolu olan Türk Hava Yolları'nın büyük etkisi vardır.

2019 yılında havacılık sektöründe etkinlik ve verimlilik açısından ABD, İngiltere, Fransa, Almanya, Çin, Kanada ve Suudi Arabistan başı çeken ülkelerdir. Bu ülkeler bu güçlü sonuçları havacılık alanındaki dinamik ve proaktif davranışlarına borçludur.

Tablo 6
CCR-I Ortalama Değerleri

Ülkeler	2015	2016	2017	2018	2019	Toplam Faktör Verimliliği
ABD	1	1	1	1	1	1
Türkiye	0,5856	0,8063	0,5434	0,8361	0,4578	0,6458
Çin	1	1	0,5163	1	1	0,9032
Kanada	1	1	1	1	1	1
Japonya	1	0,8199	0,8219	0,9369	0,3924	0,7942
Birleşik Krallık	0,8081	0,8424	1	0,8669	0,5596	0,8154
Fransa	0,6135	0,6112	0,8936	0,5055	0,5518	0,6394
Almanya	1	1	1	1	0,7297	0,9459
Endonezya	0,5954	0,6116	0,2863	0,6176	0,068	0,4357
Hindistan	0,4145	0,3191	0,219	0,3191	0,1069	0,2757
Arjantin	1	1	1	1	1	1
Avustralya	1	1	1	1	1	1
İtalya	0,9784	1	1	1	1	0,9956
Brezilya	1	1	1	1	0,2205	0,8441
Meksika	0,379	0,4035	0,2019	0,4597	0,1371	0,3162
S. Arabistan	0,578	0,5305	0,4842	0,5406	0,4655	0,5197
Rusya	1	1	1	1	1	1
Güney Afrika	1	1	0,1993	1	0,1533	0,6705
Güney Kore	1	0,8138	0,9193	1	1	0,9466

Tablo 7'de BCC modeli için toplam faktör verimlilik değerleri yer almaktadır.

Tablo 7
CCR-I ortalama değerleri

Ülkeler	2015	2016	2017	2018	2019	Toplam Faktör Verimliliği
ABD	1	1	1	1	1	1
Türkiye	0,5871	0,826	0,6488	1	1	0,8123
Çin	1	1	1	1	1	1
Kanada	1	1	1	1	1	1
Japonya	1	0,9887	0,9224	0,987	0,4926	0,8781
Birleşik Krallık	1	1	1	1	1	1
Fransa	0,9574	0,9995	1	1	1	0,9913
Almanya	1	1	1	1	1	1
Endonezya	0,6243	0,6176	0,3485	0,62	0,1382	0,4697
Hindistan	0,4582	0,3995	0,2239	0,3339	0,2009	0,3232
Arjantin	1	1	1	1	1	1
Avustralya	1	1	1	1	1	1
İtalya	1	1	1	1	1	1
Brezilya	1	1	1	1	1	1
Meksika	0,4922	0,44	0,3871	0,5603	0,7346	0,5228
S. Arabistan	1	1	1	1	1	1
Rusya	1	1	1	1	1	1
Güney Afrika	1	1	0,7424	1	0,9791	0,9443
Güney Kore	1	0,9677	1	1	1	0,9935

SONUÇ

Bu çalışmada hem Türkiye'nin havacılık sektöründeki rolünün daha iyi anlaşılması hem de G-20 ülkelerine göre olan durumu ele almak için CCR, BCC ve malmquist toplam faktör analizi yöntemleri ile kapsamlı bir biçimde objektif bir değerlendirme yapılması amaçlanmıştır. Havacılık sektörü, ülkelerin stratejik çıkarlarına askeri, siyasi ve ekonomik üstünlük sağlaması nedeniyle en önemli çalışma alanı olarak güncelliğini korumaktadır.

Türkiye sahip olduğu konum ve askeri üstünlükleri sebebiyle de havacılık sektöründe çok önemli bir avantaja sahiptir. Günümüzde en çok tercih edilen ulaşım aracının havayolu olması, Türkiye'nin bu sektörde her zaman sektörün gereksinimlerini karşılayabilmesini gerektirdiğini göstermektedir. Bu çalışmada, G-20 ülkelerinin ve Türkiye'nin havacılık alanında operasyonel ve finansal açıdan etkinlik düzeyleri belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan çok aşamalı analitik yaklaşımlar ile ülkeler için elde edilen farklı girdi ve çıktı faktörlerine bağlı olarak objektif bir değerlendirme imkanı sağlanmaktadır. Çalışmanın sonuçlarına göre eksik kalınan noktalarda iyileştirmeler yapılacağı vurgulanarak bu eksiklerin nasıl giderileceği belirlenmiştir.

Bu çalışmada G20 ülkelerinin havacılık alanındaki performansına odaklanılmış ve G20 ülkeleri ile karşılaştırıldığında Türkiye'nin havacılık sektöründeki konumu incelenmeye çalışılmıştır. Söz konusu performans analizi BCC, CCR ve malmquist toplam faktör analizi yöntemi modelleri ile gerçekleştirilmiştir. Türkiye'nin hava sahasından dünya liderleriyle yarıştığı görülmekte ve bu başarısının devamlılığı için neler yapılacağı ortaya konulmaktadır. Çalışmada her dönem etkin olan ve

etkin olmayan ülkeler değişmektedir. O dönem içinde bulunulan ekonomik, sosyal ve politik koşullar etkilidir. Ancak genel olarak değerlendirme yapıldığında, her yıl tam etkin performans gösteren ülkeler arasında ABD, Kanada, Arjantin, Avustralya ve Rusya yer almıştır. Bu temel istikrarlı ve güçlü performansın altında yatan ana etmenin özellikle Rusya ve ABD'nin havacılık konusundaki teknolojik üstünlüğü, ciddi yatırım politikaları ve dolayısıyla sektöre yansıyan hammaddelerin düşük maliyetli olması olabilir.

Çalışmada kısıtlı sayıda yer alan veriye dayanarak girdi ve çıktı değişkenler belirlenmiş ve analiz gerçekleştirilmiştir. Buna göre değişken sayısı artırılarak daha geniş ölçekte bir analiz gerçekleştirilebilir. Bunun yanında veri kısıtlılığı nedeniyle son üç dönemlik verilere ulaşılabilmektedir. Dönem sayısı arttırılırsa daha geniş ölçekte ve daha tutarlı analizler gerçekleştirilebilir. Gelecek araştırmalar için stokastik VZA yöntemi kullanılabilir ve daha fazla/farklı sayıda değişken analize katılabilir. Ayrıca daha farklı ülkeler de analize dahil edilerek sadece G20 ülkeleri için değil dünya geneli bir sıralama ortaya konulabilir. Belirsizlik altında değerlendirme yapılacak olursa bulanık VZA yaklaşımı kullanılabilir. Birden fazla metodun da yer alacağı entegre yaklaşımlarla da analiz kapsamı genişletilebilir.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışmada etik kurul onayı gerektiren insan veya hayvan denekleri kullanılmamıştır. Araştırma, kamuya açık veri setleri, literatür taramaları veya teorik analizler üzerinden yürütülmüştür. Etik kurallar gereği, araştırma sürecinin her aşamasında akademik dürüstlük ve bilimsel etik kurallara tam uyum sağlanmıştır. Bu nedenle, etik kurul onayı gerekmemiştir.

Yazar Katkıları

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) Serkan Tunç (%20), Ahmet Vural (%20), Beyzanur Çayır Ervural (%30), Abdullah Gök (% 10) Ahmet Vural (% 10) Muhammed Emre Sarıkaya (%10)

Veri Toplama (CRediT 2) Abdullah Gök (% 20) – Ali Arda Karaaslan (% 10) Serkan Tunç (% 40) Muhammed Emre Sarıkaya (%10) Ahmet Vural (%20),

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Beyzanur Çayır Ervural, (%30) – Serkan Tunç (%30) Muhammed Emre Sarıkaya (%20) Abdullah Gök (%20)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Serkan Tunç (% 40) -Beyzanur Çayır Ervural (% 30) - Ahmet Vural (% 10) - Abdullah Gök (%10) Muhammed Emre Sarıkaya (%10)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Serkan Tunç (%50) Beyzanur Çayır Ervural (% 50)

Finansman

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209-A projesi kapsamında (Destek Numarası: 1919B012223665) desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması

Çıkar çatışması yoktur.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 8 İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 9 Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı

REFERANSLAR

- Angelos. T.K., & Michael. A.M., (2018). Comparative Efficiency Analysis of Major International Airlines Using Data Envelopment Analysis: Exploring Effects of Alliance Membership and Other Operational Efficiency Determinants. *Journal of Air Transport Management*, 70, 1-17.
- Barbot. C., Costa. A., & Sochirca. E., (2008). Airlines Performance In The New Market Context: A Comparative Productivity and Efficiency Analysis. *Journal of Air Transport Management*, 14, 270-274.
- Barros. C.P., & Peypoch. N., (2009). An Evaluation of European Airlines' Operational Performance, *International Journal of Production Economics*, 122, 525-533.
- Budak, H. (2011). Veri Zarflama Analizi ve Türk Bankacılık Sektöründe Uygulaması. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 23(3), 95-110.
- El-Mahgary. S., & Lahdelma. R., (1995). Data Envelopment Analysis: Visualizing the Results. *European Journal of Operational Research*, 83 (3), 700-710.
- Ervural, B. C., Zaim, S., & Delen, D. (2018). A two-stage analytical approach to assess sustainable energy efficiency. *Energy*, 164, 822-836.
- Esin, M., & Düzgün, M., (2021). Küreselleşme Sürecinin Havayolları İşletmeleri Üzerine Etkisi ve Sonuçları. *Uluslararası Hukuk ve Sosyal Bilim Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 19-35.
- Gheorghe C., & Sebea M., (2010). The Economic And Social Benefits of Air Transport. *Ovidius University of Constantza, Faculty of Economic Sciences*, 0(1), 60-66.
- Hashem. S. J., & Noor. A. I., (2014). Application of Structural Equation Modelling For Estimating Airline Performance. *Journal of Air Transport Management*, 40, 25-33.
- International Civil Aviation Organization (2021). *Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis*.
- Karataş. Y. (2020). Havacılık Sektöründe Performans Analizi, Performansı Etkileyen Faktörler ve Strateji. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Kostas. A.T., Bozoudis. M.N., & Madas. M.N., (2020). Turbofan Aero-Engine Efficiency Evaluation: An Integrated Approach Using VSBM Two-Stage Network DEA. *Omega*, 92, 102167.
- Cui, Q., & Yu, L. T., (2021). A Review of Data Envelopment Analysis in Airline Efficiency: State of the Art and Prospects. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 1-13.
- Okursoy. D., (2015). Veri Zarflama Analizi ile Göreli Etkinliklerin Karşılaştırılması: Türkiye' deki İllerin Kültürel Göstergelerine İlişkin Bir Uygulama.
- Schefczyk. M., (1993). Operational Performance of Airlines: An Extension of Traditional Measurement Paradigms. *Strategic Management Journal*, 14, 301-317
- Eski, S., & Tasus, H. S. (2018). Havaalanlarında Sunulan Yer Hizmetlerinin Avrupa Ekonomisine Etkisi: Türkiye, Almanya ve İngiltere Uygulamaları. *Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 20(1), 56-83.
- Zook, M. A., & Brunn, S. D. (2005). Hierarchies, Regions and Legacies : European Cities and Global Commercial Passenger Air Travel. *Journal of Contemporary European Studies*, 13(2), 203-220.
- Baydaş, M., Eren, T., & İyibildiren, M. (2023). Normalization Technique Selection for MCDM Methods: A Flexible and Conjunctural Solution that can Adapt to Changes in Financial Data

Types. Necmettin Erbakan Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi, 5(Özel Sayı), 148-164.

İnce, M. R., & Tarı, R. (2023). Verimlilik ve Kur Şoklarının İhracat, Ekonomik Büyüme ve Refah Üzerindeki Etkisi: Türkiye Üzerine Hesaplanabilir Genel Denge Analizi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi, 5(Özel Sayı), 15-34.

Koç, Ş., & Özcan, G. (2023). Endüstri 4.0'ın Ekonomik Büyüme Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi: G7 Ülkeleri İçin Panel Veri Analizi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi, 5(1), 1-16

Eurocontrol, <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-comprehensive-aviation-assessment-archive-2022>

Türk Hava Yolları, https://investor.turkishairlines.com/documents/yillik-raporlar/2020-yillik-faaliyet-raporu_v2.pdf

Statista, <https://www.statista.com/statistics/564769/airline-industry-number-of-flights/>

Worldbank, <https://databank.worldbank.org/home.aspx>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Air transport is one of the important pillars of the transport mechanism. The aviation sector emerges as the most basic and primary field of study, as it provides military, political, and economic superiority to the strategic interests of the countries. The G-20 countries are also the world's leading and powerful economies. The share of the aviation sector in this economic power is quite high. Although the G-20 countries have leading airline companies and high-level technology in the field of aviation, Turkey has made important breakthroughs in the aviation sector, especially in recent years, and has even managed to leave some G-20 countries behind in this field. Turkey has a very important position in the aviation industry. Due to its location, Turkey can be defined as a bridge connecting Asia and Europe. The fact that the most preferred means of transportation today is the airline shows that Turkey should always be able to meet the requirements of the sector in this sector. For example considering the end of 2020, Istanbul Airport has made its mark in history as the airport serving the highest number of passengers in Europa, following London Heathrow Airport and Frankfurt Airport. At this point, the airline company that has the largest share is Turkish Airlines, which makes the most flights in the world 2020. In this study, we will seek answers to questions such as how Turkey can improve itself in air transportation competition with these world giants and what kind of deficiencies it has compared to these countries in the future. While searching for these answers, we will take into account the data obtained as a result of the operational and financial inputs and outputs of the countries with the data envelopment analysis (DEA) method.

Table 1. World Passenger Traffic Ranking (General Directorate Strategy Development, 2020)

Rank	Country	Total Passenger	2020
1	USA	680.731.488	-58,8%
2	CHINA	415.584.698	-34,2%
3	INDIA	118.987.811	-60,3%
4	RUSSIA	94.062.404	-45,8%
5	JAPAN	87.958.206	-65,1%
6	BRAZIL	83.919.464	-52,0%
7	MEXICO	75.254.844	-49,8%
8	UNITED KINGDOM	73.596.256	-75,5%
9	TÜRKİYE	68.058.915	-63,0%
10	SOUTH KOREA	64.898.048	-58,8%
11	FRANCE	63.116.503	-68,0%
12	SPAIN	58.915.435	-74,4%
13	GERMANY	55.190.373	-77,9%
14	ITALY	50.237.057	-73,1%
15	THAILAND	46.618.200	-67,4%
16	CANADA	40.630.665	-72,3%
17	UNITED ARAB EMIRATES	36.135.689	-70,6%
18	SAUDI ARABIA	35.353.036	319,8%
19	AUSTRALIA	33.792.079	-72,3%
20	NETHERLAND	23.500.907	-70,8%

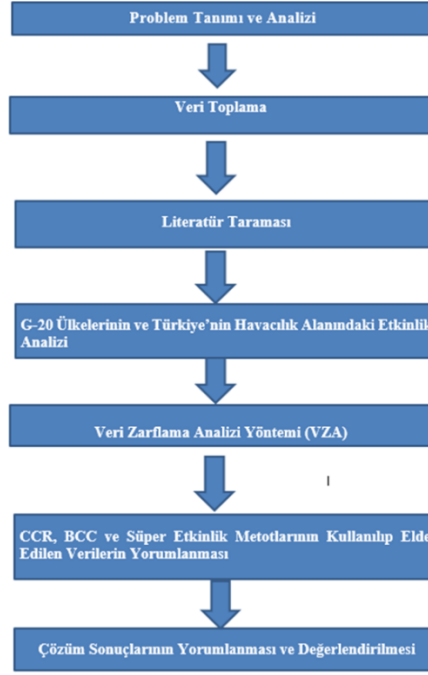


Figure 1. The flowchart of the analysis

Purpose: The world aviation industry is developing day by day. As a result of this development, the need to measure the aviation performance of countries arises. The purpose of this study is to determine the operational and financial efficiency levels of G-20 countries and Turkey in the field of aviation. The analytical approach to be used in the study provides an objective assessment based on the different input and output factors obtained for the countries.

Method: The study has been handled using the data envelopment method. The data envelopment analysis (DEA) method is a nonparametric analysis method based on a linear programming model. It is a useful technique for assessing the relative efficiency of a set of decision-making units.

Results: As a result of the evaluation of 2015 for each of the G20 countries and the implementation of the input-oriented BCC-I model, a total of 14 countries showed 100% effective results. (USA, China, Canada, Japan, UK, Germany, Argentina, Australia, Italy, Brazil, Saudi Arabia, Russia, South Africa and South Korea).

Conclusion: The aim of this study is to determine the operational and financial efficiency levels of G-20 countries and Turkey in the field of aviation. By evaluating the internal dynamics of the airspace, the deficiencies of Turkey in the aviation sector against the G-20 countries are evaluated by analyzing both the impact of developing technology and globalization. Using the data envelopment analysis (DEA) method, in the light of accurate and reliable results, Turkey's position in the aviation sector against the G-20 countries is evaluated with approaches based on analytical and objective methods, and how it can raise itself to a higher position in the world aviation ranking by identifying the issues it lacks. It is expected to be useful for researchers working on this subject.

Use of Microstrip Antennas in Aerospace Applications: L5 Band Satellite Communication Example

Özgür DÜNDAR¹  Mustafa Furkan ATEŞ^{2*} 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Konya, Türkiye

² Maverik Dream Works, Konya, Türkiye

Article Info

Received: 05.12.2023
Accepted: 10.01.2024
Published: 30.06.2024

Anahtar Kelimeler:
Microstrip Antenna,
GPS,
GNSS,
L5 Band.

ABSTRACT

Today, microstrip antennas are preferred in many aerospace applications such as high-performance vehicles, aircraft, military aircraft, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), spacecraft, radar systems, satellite and missile applications. In this study, the use of microstrip patch antennas in the aerospace industry and especially in global positioning systems (GPS) has been investigated and a sample microstrip patch antenna design has been realized in the GPS L5 security band. The designed antenna with high gain and circular polarization is simulated with High Frequency Structural Simulator (HFSS) and the results are analyzed. Numerical analysis of the simulations showed that at the center frequency of 1176 MHz, the S11 value was -38.85 dB, the bandwidth was 54 MHz and the gain was 6.07 dBm. As a result of these values, it is concluded that it can be used in the global positioning L5 security band.

Havacılık Uygulamalarında Mikroşerit Anten Kullanımı: L5 Band Uydu Haberleşme Örneği

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 05.12.2023
Kabul Tarihi: 10.01.2024
Yayın Tarihi: 30.06.2024

Anahtar Kelimeler:
Mikroşerit Anten,
GPS,
GNSS,
L5 Band.

ÖZET

Günümüzde mikroşerit antenler, yüksek performans gerektiren araçlarda, uçaklarda, askeri uçaklarda, İnsansız Hava Araçlarında (İHA), uzay araçlarında, radar sistemlerinde, uydu ve füze uygulamaları gibi pek çok havacılık alanında tercih edilmektedirler. Bu çalışmada, Mikro şerit yama antenlerin havacılık sektöründe kullanım alanları ve özellikle küresel konumlama sistemlerinde (GPS- Global Positioning System) kullanımı araştırılmış ve GPS L5 güvenlik bandında örnek bir mikroşerit yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen yüksek kazançlı ve dairesel polarizasyonlu anten High Frequency Structural Simulator (HFSS) program ile simüle edilerek sonuçlar incelenmiştir. Yapılan simülasyonların nümerik analizinde neticesinde 1176 MHz merkez frekansında, S11 değerinin -38.85 dB olan, band genişliğinin 54 MHz ve kazancının ise 6.07 dBm olduğu görülmüştür. Elde edilen bu değerler neticesinde küresel konum belirleme L5 güvenlik bandında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

To cite this article:

Dündar, Ö., & Ateş, M. F. (2024). Use of microstrip antennas in aerospace applications: L5 band satellite communication example. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(1), 69-78. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.3.1>

*Sorumlu Yazar: Özgür DÜNDAR, odundar@erbakan.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ

Communication can be broadly defined as the transfer of information as electromagnetic energy from one point to another. Information transfer within the communication system is achieved by modulating the information into an electromagnetic wave, which acts as the carrier of the information signal (Balanis, 2005). When the modulated carrier reaches the desired destination, the original information signal is demodulated and re-acquired. In today's modern communication systems, antennas are the most important components of communication links (Karaaslan et al., 2013). Antennas are especially indispensable elements of aviation communication systems.

In today's communication technologies, Microstrip Patch Antennas are often preferred in outdoor applications due to their superior characteristics. Furthermore, because of their benefits—including low cost, high performance, ease of installation and production—microstrip patch antennas have gained popularity among microwave antennas. These advantages can be found in a variety of aerospace fields, including automobiles, military aircraft, spacecraft, Unmanned Aerial Vehicles (UAV), radar systems, satellites, and missile applications that demand high performance (Balanis, 2005). This is because they provide a thin planar configuration that can be very easily assembled and integrated without causing drag for vehicle surfaces such as aircraft or missiles. The ease of fabrication using printed circuit boards, easy assembly of the antenna to the rest of the circuit board, and the flexibility to add hardware to make such active antennas make microstrip antennas a special and preferred choice for any aircraft or missile application, given their aerodynamic properties (URL 1).

The use of internet in the cabin during flight is a new and developing technology today, and its use in the aviation industry is becoming more popular and available day by day. Especially in air travel, people want to be able to use their mobile devices. There are many studies, examples and productions that allow passengers to use their mobile phones in the aircraft.

In their study in 2023, Dündar & Koyuncu designed a microstrip patch antenna that can be integrated into mobile personal devices such as mobile phones, tablets, laptops, etc. and can communicate simultaneously with both 4G (LTE) and 2.4 GHz WiFi wireless communication bands during the journey. As a result of the design and simulations with the HFSS program, it was observed that with a gain of 3.085 dBm at the center frequency of 2.5720 GHz and a bandwidth of 2.453 - 2.703 MHz, passengers can communicate with both the 2600 MHz FDD and TDD band used for 4G - LTE mobile network communication and 2.4 GHz WiFi channels 9-14 during in-flight travel (Dündar & Koyuncu, 2023).

There are also studies on next generation 5G communication for in-flight internet use. Dündar et al. developed a microstrip patch antenna system in their 2021 study that may be utilized as an access point on Airbus A321 aircraft and offers internet connectivity in the 5GHz band. Additionally, a simulation of electromagnetic field emission and the installation of the intended antennas inside the aircraft cabin were done. The IEEE 802.11 ac/ax standard was followed in the design of the microstrip antennas. Using FR-4 dielectric material, 4 antennas and 5300 MHz (CH 60) center frequency are used to deliver 5GHz WiFi internet service. The intended antennas are utilized as access points and have fiber connections between them. The HFSS simulation tool was used to simulate the electromagnetic field emission of the antennas installed within the cabin (Dündar et al., 2021).

Sreejith et al. carried out antenna design studies in the Ku band range for use in airline aircraft. In order to use the system more effectively, they designed a circular microstrip array antenna with dual polarization. It is also aimed to minimize the negative impact on aircraft aerodynamics by creating the antenna design in a foldable structure. RO4003C ($\epsilon_r=3.55$) was selected as the patch layer of the 8x8

antenna. Simulation results show that the antenna has a bandwidth of 750 MHz and inter-port isolation is better than 25dB (Sreejith et al., 2022).

In 2023, Banerjee and colleagues from the University of San Diego designed a microstrip array antenna for dual-band communication in the K-/Ka band frequency range. This antenna can radiate in the frequency range of 22.55-23.55 GHz and 25.5-27.5 GHz. Similar to the other study, Banerjee opted for an 8x8 type antenna design. The antenna has a gain of 21 dBi at 23.05 GHz and 22.3 dBi at 26.5 GHz, according to simulation studies (Banerjee et al., 2023).

In another study, Martinez et al. developed an 8x8 microstrip array antenna system at Ku band frequency. The distinguishing feature of this study is that the antenna structure is bendable. The most important reason for choosing this type of structural material is that the antenna should not have a negative aerodynamic effect when the antenna is mounted on the airplane. The designed antenna was also manufactured and tested with the bendable structure. In addition, the simulation program was used to place the antenna on the aircraft model and analyze the radiation pattern (Martinez-Vazquez et al., 2021).

Another issue that needs to be investigated in phased array antenna or moving antenna systems is the ability of antenna systems placed on vehicles such as airplanes, automobiles, ships, etc. to track the satellite. In this regard, in moving antenna systems, the antenna platform should be motorized, and satellite tracking should be realized while the vehicles are in motion with motor control with reference to the satellite tracking signal. In this type of antenna systems, signal level and antenna pattern changes with antenna offset angle are analyzed (Tsuji et al., 2014).

In the paper published by Zhang et al. we can examine the design of a 4x4 phased array antenna at Ka band frequency. In this study, a system was built that has a gain of 6 dBi at 35 GHz. It is evident that the aperture microstrip antenna logic is used to realize the design and that the antenna system is constructed using microstrip feed. According to (Zhang et al., 2016), this indicates that the antenna radiation produces better outcomes, with an S_{11} value of -35 dB.

Lightweight and aerodynamic, microstrip antennas are used in aircraft radar systems. In this way, they can increase safety measures by monitoring the aircraft's surroundings. Wide coverage can be achieved by placing microstrip antenna arrays on some low-profile curved surfaces. These surfaces can be assembled into shapes that match the fuselage, wing or skeleton of an aircraft or missile, thus increasing the use of this type of antenna for many applications. The single curved surface can also be used as an approximate shape that fits into the aircraft wing, fuselage or outer compartments. Such a design also prevents detection by the enemy in all defense applications, including radar and communication systems (URL 2).

Chen et al. created a microstrip beam array antenna for a missile in their 2018 work. The S_{11} reflection parameter is 1GHz bandwidth at 34.02–35.05 GHz, and the antenna center frequency is 34.5 GHz. With a diameter of only 16 mm, the antenna is 50% smaller than a typical array antenna. The angle between the antenna beam angle and the normal is 35°, and the antenna beamwidth is 36°. Within the 36° to 72° angle of incidence of the fuze, the antenna's main beam can be vertically illuminated towards the ground target.

Geolocation has been one of the most important needs from past to present. While different primitive methods were used in the past, the most up-to-date Global Satellite Positioning Systems (GNSS) are used today. GNSS allows us to determine the latitude, longitude, altitude, speed and time information of any point in the world with a certain accuracy by using satellites positioned globally on the earth orbit.

GNSS is mainly based on satellites. GNSS receivers take into account the arrival time of the position orbit signal from the satellite and calculate the distance to the satellite and the delay time of the signal. The signal from a single satellite is not sufficient for position determination. If signals from at least 3 satellites are received to determine the position, the GNSS receiver can determine the position on the earth. However, since the satellite and GNSS receiver clocks are not synchronized, it is necessary to receive time information from another satellite.

Global positioning systems (GPS) have a wide range of uses but can be categorized under 2 main headings. These are civilian and military uses. In military use, there are many areas of use such as intercontinental missiles, positioning in manned and unmanned land, air (UAV, UCAV) and sea vehicles. Civilian uses are very wide and include GPS aircraft tracking, aviation, intelligent navigation systems, autonomous vehicles, cartography.

The electromagnetic waves sent by GPS satellites undergo bending as they pass through the atmosphere. Since the L1 and L2 bands have different wavelengths, they are diffracted at different rates. By calculating the difference and reducing the effect of atmospheric distortion, much more precise location information can be obtained. While an accuracy of 98 m can be achieved by using only the L1 band, it is possible to achieve an accuracy of less than 1 m with the joint use of the L1 and L2 bands. As part of the modernization of GPS, a new frequency allocation was made for GPS in 2009. This signal, called L5, started to be broadcast over Block IIF satellites in 2009, mainly for the purpose of safe navigation of aircraft (Erdemir, S., 2013).

In GPS measurements, electromagnetic waves are used to transmit data from satellites to users. Each GPS satellite has three basic frequencies, L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) and L5 (1176.45 MHz) for civilian use. Microstrip patch antennas with small size, high transmittance interlayer and circular polarization are a favorite choice for GPSs and are widely used in positioning systems. Single band, two band and three band microstrip patch antenna designs are available in the literature.

In 2002, Chih-Ming SU and Kin-Lu WONG designed a dual-band coaxial line fed microstrip patch antenna using FR-4 dielectric material operating in L1 and L2 bands. They obtained bandwidths of 15 MHz and 17 MHz and gains of 1.5 and 4.5 dBi, respectively (Su & Wong, 2002).

In 2004, Xiang-Fei PENG et al. designed a compact dual band antenna. The antenna designed in this study is stacked, coaxially fed and operates in L1 and L2 bands. The antenna was designed and analyzed with Ansoft HFSS software. They used a dielectric material with a coefficient of 12 for the bottom layer and 9.2 for the top layer. As a result of the analysis, they obtained bandwidth values of 20 MHz, 16 MHz and gain values of 2.4 dBi and 4.5 dBi for L1 and L2 bands, respectively (Peng et al., 2005).

Onur AKTAŞ, in 2019, designed, analyzed and produced a GNSS antenna that can operate in the L1 band and a GPS antenna that can operate in the L1 band. They designed the antenna with the CST program. They used RO3003 as dielectric material. By increasing the thickness of the dielectric layer, they achieved a bandwidth of 70 MHz in the L1 band (Aktaş, 2019).

In Cemal ŞEN's study in 2020; they designed stacked microstrip antennas operating in L1, L2 and L5 bands. The antennas were optimized using the MWS module of the CST program. They designed 6 designs, one single layer microstrip antenna for each band, one double layer microstrip antenna operating simultaneously in L1 and L2 bands and 2 stacked microstrip antennas operating simultaneously in L1, L2 and L5 bands. The designed antennas are fed by coaxial line. . In this antenna, they obtained a gain of 3.28 dB, 2.49 dB and a bandwidth of 41 Mhz and 53.4 Mhz, respectively. They used FR-4 dielectric material for the antenna operating in L1, L2 and L5 bands. The

antenna gains were found to be 1.59 dB, 2.57 dB and 1.615 dB, respectively (Şen, 2020).

In 2020, Mishra et al. realized a circularly polarized planar antenna covering the global positioning system L1, L2 and L5 bands. An internal feed line excites an elliptical patch, which makes up the antenna. In order to achieve dual-band response covering the L1, L2, and L5 bands, two concentric ring slots are etched into the ground plane. To achieve circular polarization, load two slots on the elliptical patch and integrate a quarter-wavelength spring with an internal feed. To cover the GPS L5 band, the quarter-wavelength spring also broadens the lower resonant band's impedance bandwidth. The antenna also meets the criterion of 1 dBi gain flatness of the GPS antenna. A prototype of the antenna has been fabricated and the experimental results are in good agreement with the simulated results (Mishra et al., 2020).

METHOD

Microstrip Patch Antenna Design

Because of their small size, light weight, and ease of integration with portable devices, planar circularly polarized (CP) antennas are widely used in modern wireless communication systems, biomedical equipment, radio frequency identification (RFID) devices, and satellite positioning systems. According to (Kumar et al., 2017), the CP antenna offers steering flexibility between the transmitter and receiver in addition to mitigating the effects of multipath fading. Widely used navigation systems such as BeiDou Navigation Satellite System (BDS), Galileo, Global Positioning System (GPS), Global Navigation Satellite System, and Quasi-Zenith Satellite System use L-band right-handed circular polarization (RHCP) antennas for their operation (Babakhani et al., 2017). The L band (1-2 GHz) is divided into five sub-bands: L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.6 MHz), L3 (1381.05 MHz), L4 (1379.913 MHz) and L5 (1176.45 MHz) for various operations of GPS (Mishra et al., 2020).

In April 2014, the US Air Force decided to broadcast civil navigation (CNAV) messages on L2C and L5 signals. For this purpose, some updates were made in the GPS control section (URL 3).

L5 is a third civil GPS signal designed to meet the demanding requirements for life safety and other high-performance applications. The frequency of the L5 signal is 1176 MHz. L5 is broadcast in a radio band reserved exclusively for aviation safety services. In the future, it is planned to use L5 together with L1 C/A. With the use of L5, it is aimed to increase the accuracy of the system as well as the capacity utilization and fuel efficiency on airlines, railways, maritime roads and highways (Koca & Ceylan, 2018).

The designed antenna has been realized in the L5 band at the center frequency of 1176 MHz and within the scope of the Computer Aided MVA Design course. The design started with the selection of the substrate material and FR4 material was chosen for its easy accessibility and low cost. The relative dielectric constant $\epsilon_r=4.4$, the loss tangent $\tan\delta=0.02$ and the dielectric base thickness $h=1.6$ mm was chosen for high bandwidth. In order to calculate the antenna dimensions in the following steps, the constant of the dielectric material will be calculated using the material thickness. The patch width is denoted by W and is calculated using Equation 1 as follows.

$$W = \frac{c_0}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

In the related equation, c_0 is the speed of light and f_c is the center frequency. For a center frequency of $f_c=1176$ MHz, the antenna width $W=77.625$ mm. According to these values; since the condition $W/h \geq 1$ is satisfied, the effective dielectric constant ϵ_{eff} is calculated using Equation 2.

$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

For $\varepsilon_r=4.4$, $h=1.6$ mm and $W=77.625$ mm; $\varepsilon_{\text{reff}}=4.222$ was obtained.

$$L_{\text{eff}} = \frac{c_0}{2f_c \sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}} \quad (3)$$

When the effective length L_{eff} is calculated with the formula given in Equation 3 and using the values $c_0 = 3 \times 10^8$ m/s, $\varepsilon_{\text{reff}}=4.222$ and $f_c=1176$ MHz; $L_{\text{eff}}=63.563$ mm.

$$\Delta L = 0.412 \frac{(\varepsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right) h}{(\varepsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (4)$$

$$L = \frac{c_0}{2f_c \sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L \quad (5)$$

When calculating the microstrip antenna patch length L and fringe value ΔL , $L=60.550$ mm from Equation 5 using the values of W , c_0 , $\varepsilon_{\text{reff}}$, f_c , L_{eff} and h found above. As a result of all the calculations, the patch dimensions were determined as $W=77.625$ mm and $L=62.075$ mm.

Table 1
Antenna Parameters

Parameter	Value
Dielectric Material	FR-4
f_c	1176 MHz
c_0	3×10^8 m/s
ε_r	4.4
W	77.625 mm
L	60.550 mm
$\varepsilon_{\text{reff}}$	4.222
L_{eff}	63.563 mm

The physical parameter values of the designed antenna are summarized in Table 1.

RESULTS

According to the physical parameters of the antenna given in Table 1, the coaxial fed patch antenna design was simulated with the HFSS simulation program and numerical analysis was performed. Images of the designed microstrip patch antenna are given in Figure 1.

When the simulations of the designed antenna made with the HFSS Program are examined, it is seen that the center frequency in the S11 graph is 1176 MHz and the return loss S11 value is -38.85 dB. The related graph is shown in Figure 2. The region where the S11 parameter, which is the relative expression of the reflection coefficient or return loss, is below -10 dB is considered as the efficient radiation region for antennas. When we look at the area below the -10 dB reference value, it is seen that an antenna with a bandwidth of 54 MHz was designed.

On the other hand, when the gain graph of the designed microstrip antenna in Figure 3 is

examined, both the radiation pattern image is seen and the gain of 6.07 dBm is simulated as a three-neck image by the HFSS program.

Figure 1
General View of the Designed Microstrip Antenna

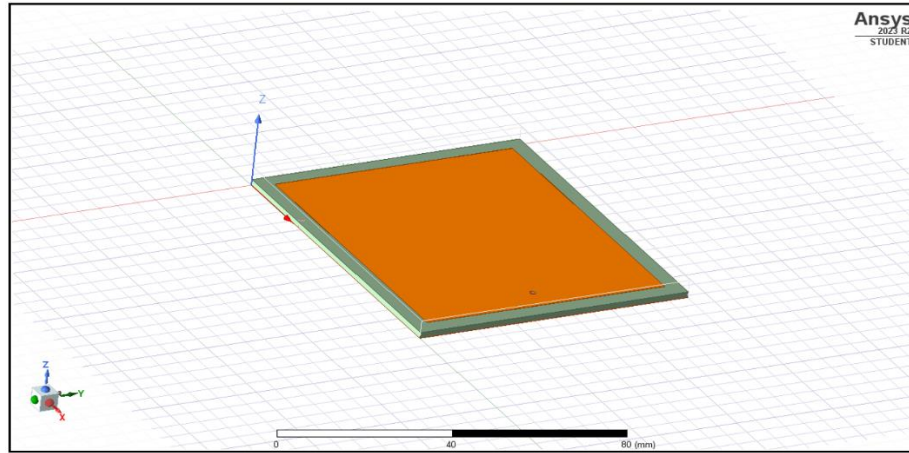


Figure 2
Microstrip Patch Antenna S11 Parameter Graph

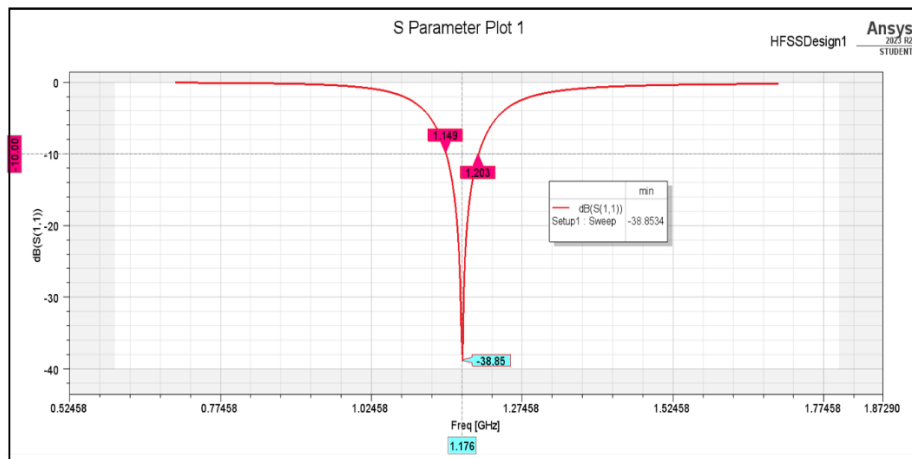
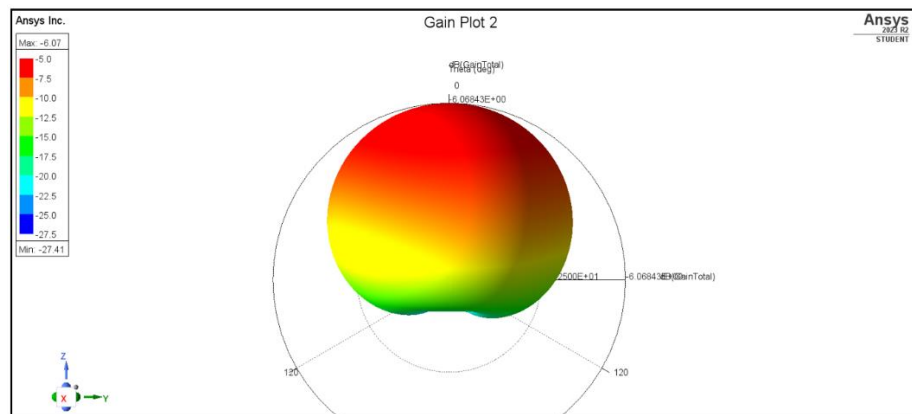


Figure 3
Microstrip Patch Antenna Gain Graph



CONCLUSION

The aim of this study is to design a high gain microstrip patch antenna for use in the L5 GPS band, which is broadcast in the radio band reserved for aviation security services.

As a result of the design and numerical analysis of the simulations made with the HFSS program, it was seen that at the center frequency of 1176 MHz, the S11 value was -38.85 dB, the bandwidth was 54 MHz and the gain was 6.07 dBm. As a result of these values, it is concluded that it can be used in the global positioning L5 security band.

Since this study was carried out as a student project within the scope of Computerized Microstrip Antenna Design course, an L5 band micro strip antenna was designed as an example. The main objective is to design a tri-band micro strip antenna that covers L1, L2 and L5 bands simultaneously. This study is a preliminary work towards this goal. Triple band is set as the target for further studies.

Ethics Committee Approval

This study did not use human or animal subjects that require ethics committee approval. The research was conducted on publicly available data sets, literature reviews or theoretical analyses. In accordance with ethical rules, academic integrity and scientific ethics were fully complied with at every stage of the research process. Therefore, ethics committee approval was not required.

Author Contributions

Research Design (CRediT 1) Özgür DÜNDAR (%60) – Mustafa Furkan ATEŞ (%40)

Data Collection (CRediT 2) Özgür DÜNDAR (%50) – Mustafa Furkan ATEŞ (%50)

Research - Data Analysis - Validation (CRediT 3-4-6-11) Özgür DÜNDAR (%60) – Mustafa Furkan ATEŞ (%40)

Writing the Article (CRediT 12-13) Özgür DÜNDAR (%60) – Mustafa Furkan ATEŞ (%40)

Revision and Improvement of the Text (CRediT 14) Özgür DÜNDAR (%50) – Mustafa Furkan ATEŞ (%50)

Funding

The study did not receive any financial support.

Conflict of Interest

There is no conflict of interest between the authors.

Sustainable Development Goals (SDGs)

Sustainable Development Goals: 11 Sustainable Cities and Communities

Sustainable Development Goals: 15 Terrestrial Life

REFERENCES

- Aktaş, O. (2019). *Radomlu, Dairesel Polarizasyonlu L1 Bant GPS ve GNSS Anteni Tasarımı*. FBE, Hacettepe Üniversitesi.
- Babakhani, B., Sharma, S. K., & Mishra, G. (2017). Wideband circularly polarized his backed fan-shaped antenna with directional patterns covering L1-L5 GPS bands. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(3), 497-500.
- Balanis, C.A. (2005). *Antenna Theory Analysis and Design*, John Wiley & Sons, New York.
- Banerjee, R., Sharma, S. K., Waldstein, S. W., Downey, J. M., Schoenholz, B. L., Dever, S. M., & Das, S. (2023, January). A wideband dual linear/circular polarized 64-element phased array antenna for SATCOM applications. In 2023 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM) (pp. 60-61). IEEE.
- Chen, W., Suo, X. N., Wang, C., Wen, R. H., & Li, H. Y. (2018, December). The microstrip beamforming array antenna of millimeter wave fuze. In *2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)* (pp. 1-3). IEEE.
- Dündar, Ö., & Koyuncu, B. (2023). Kabin İçi 4G (LTE) ve WiFi Kablosuz Haberleşme Sistemlerinde Kullanılmak Üzere Mikroşerit Anten Tasarımı. *ASREL Aerospace Research Letters*, 2(1) <https://doi.org/10.56753/ASREL.2023.1.3>
- Dundar, O., Koyuncu, B., & Ozcelik, H. (2021). Microstrip Patch Antenna System Design for In-Cabin Wireless Communications and Internet Services. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics (EPSTEM)*, 14, 8-14.
- Erdemir, S., (2013). *Üç bantlı modern gps anteni analizi ve tasarımı*. Mühendislik Fakültesi Ankara Üniversitesi.
- Karaaslan, M., Ünal, E., Özer, Z., & Yılmaz, Ş. (2013). 2.45 Ghz De Yüksek Kazançlı Mikroşerit Anten Yama Anten Tasarımı ve Gerçekleştirimi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 28-31.
- Koca, B., & Ceylan, A. (2018). Uydu konum belirleme sistemlerindeki (GNSS) güncel durum ve son gelişmeler. *Geomatik*, 3(1), 63-73.
- Kumar, S., Kanaujia, B. K., Khandelwal, M. K., & Gautam, A. K. (2017). Single-feed superstrate loaded circularly polarized microstrip antenna for wireless applications. *Wireless Personal Communications*, 92, 1333-1346.
- Martinez-Vazquez, M., Verpoorte, J., Leis, J., Willemsen, M., Hulzinga, A., & Reznicek, Z. (2021). Structurally integrated phased array antennas for aeronautical SatCom applications. *15th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2021*.
- Mishra, S., Das, S., Pattnaik, S. S., Kumar, S., & Kanaujia, B. K. (2020). Low-profile circularly polarized planar antenna for GPS L1, L2, and L5 bands. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(2), 806-815.
- Peng, X. F., Zhong, S. S., Xu, S. Q., & Wu, Q. (2005). Compact dual-band GPS microstrip antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 44(1), 58-61.
- Su, C. M., & Wong, K. L. (2002). A dual-band GPS microstrip antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 33(4), 238-240.
- Tsuji, T., Orikasa, A., Miura, M., Toyoshima, & R. Miura, (2014) "On-board Ka-band satellite tracking

antenna for unmanned aircraft system”, 2014 *International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings*, Kaohsiung, Taiwan, 2014, pp. 283-284.
<https://doi.org/10.1109/ISANP.2014.7026641>.

Zhang, Y., Bai, J., Shi, S., & Prather, D. W. (2016). Ka-band phased patch array antenna integrated with a PET-controlled phase shifter. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 26(3), 199–208. <https://doi.org/10.1002/mmce.20953>

URL 1: <https://havkar.com/tr/blog/view/mikroserit-yama-antenler/8>

URL 2: <https://doi.org/10.23919/EuCAP51087.2021.9411403>

URL 3: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>